



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Πειραιά
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Ηλεκτρολογίας

Εύκαμπτες Ηλιακές Κυψέλες

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΗΛΙΑΣ Β. ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Τσατσαρός
Καθηγητής Εφαρμογών ΕΠ, Αγγλικής Γλώσσας

Πειραιάς, Μάρτιος 2012

Περίληψη

Σκοπός εκπόνησης αυτής της πτυχιακής άσκησης είναι η παρουσίαση νέων τεχνολογιών που αφορούν τα φωτοβολταϊκά και πιο συγκεκριμένα Φ/Β λεπτού φιλμ. Παρουσιάζονται εκτενώς η χρήση διαφόρων τεχνολογιών κατασκευής, (μονολιθική κατασκευή Φ/Β, νανοτεχνολογία κ.α.) των διαφόρων τύπων Φ/Β λεπτού φιλμ. Θα εξετάσουμε παρακάτω τρεις κατηγορίες Φ/Β ανόργανων, οργανικών και συνδυασμό ανόργανων-οργανικών λεπτών φιλμ.

Στην κατηγορία ανόργανων λεπτών φιλμ θα εξετάσουμε τα άμορφου πυριτίου (a-Si), δισεληνιο-ινδιο-γαλλιούχου χαλκού ή CIGS ($Cu(In, Ga)Se_2$), τελλουριούχου καδμίου (CdTe) και δισεληνοϊνδιούχου χαλκού CIS ($Cu(In)Se_2$). Εκεί θα δούμε τον τρόπο κατασκευής και τα επιμέρους πλεονεκτήματα του κάθε τύπου.

Αντίστοιχα και στα επόμενα κεφάλαια (Κεφ. 3 και Κεφ. 4) θα αναπτυχθούν οι κατασκευαστικές τεχνικές-τεχνολογίες κατασκευής Φ/Β οργανικών και ανόργανων-οργανικών λεπτών φιλμ όπως η εκτύπωση πλαστικών ηλιακών κυψελών ή η χρήση μια ευέλικτης υβριδικής τεχνολογίας βαφής κυψελών.

Σημαντικό κομμάτι αυτής της εργασίας αποτελεί το Κεφ. 5 και τελευταίο κεφάλαιο αυτής της εργασίας όπου γίνεται αναφορά σε ρηξικέλευθες τεχνολογίες-τεχνικές κατασκευής Φ/Β όπως νανοανορθωτικές κεραίες ή ηλιακές κυψέλες από γραφένιο.

Έχει δοθεί επίσης βαρύτητα στο πόσο σημαντικό ρόλο, στην εξέλιξη κατασκευής Φ/Β, έχει παίξει η παράλληλη εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών. Στην παρούσα πτυχιακή θα δούμε υλικά και τεχνικές, τεχνολογικής αιχμής, όπως για παράδειγμα το γραφένιο και οι νανοσωλήνες άνθρακα με νανοσωματίδια χρυσού.

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου κ. Παναγιώτη Τσατσαρό, για την υπομονή του, την καθοδήγησή του και την αμέριστη βοήθειά του σε κάθε φάση της δημιουργίας της. Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου για την διαρκή τους υποστήριξη. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

Ηλίας Β. Βασιλειάδης
Πειραιάς, 1 Μαρτίου 2012

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Ευχαριστίες.....	4
Πρόλογος	8
1. Φωτοβολταϊκά	11
1.1 Η ανάγκη για φωτοβολταϊκή τεχνολογία	11
1.2 Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών	11
1.3 Πώς Λειτουργούν οι Ηλιακές Κυψέλες	13
1.4 Η Ηλιακή Κυψέλη: Μια Γεννήτρια Ρεύματος	21
1.5 Όρια Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Μετατροπής	26
2. Ανόργανα Λεπτά Φιλμ.....	29
2.1 Λεπτά Φ/Β Φιλμ : Η Τεχνολογία Για Το Μέλλον	29
2.2 Λεπτά Φιλμ Άμορφου Πυριτίου.....	36
2.3 Λεπτά Φιλμ CIGS ($Cu(In, Ga)Se_2$), (Δισεληνοϊνδιογαλλιούχος Χαλκός,) σε Μεταλλικά Φύλλα.....	41
2.4 Λεπτά Φιλμ Τελλουριούχου Καδμίου (CdTe).....	47
2.5 Λεπτά Φιλμ CIS	50
3. Οργανικές Ηλιακές Κυψέλες Λεπτού Φιλμ.....	53
3.1 Οργανικές Ηλιακές Κυψέλες	53
3.2 Ηλιακές Κυψέλες Μαζικής Ετεροδομής.....	57
3.3 Βελτιστοποίηση Οργανικών Ηλιακών Κυψελών.....	59
3.4 Τυπωμένες Πλαστικές Ηλιακές Κυψέλες	62
3.5 Βαφή Πλαστικών Ηλιακών Κυψελών Με Πινέλο	67
3.6 Πάουερ Πλάστικ, Ένα Λεπτό, Εύκαμπτο, Οργανικό Ηλιακό Πάνελ	71
4. Οργανικά-Ανόργανα Λεπτά Φιλμ.....	77
4.1 Βαφή Κυψελών: Μια Ευέλικτη Υβριδική Τεχνολογία	77
4.2 Αρχές Λειτουργίας DSC	82
4.3 Ένας οδηγός για τις DSC	90
4.4 Ενσωματωμένα κτηριακά Φ/Β με έγχρωμες ηλιακές κυψέλες.....	97
4.5 Εξατομίκευση της ηλιακής ενέργειας	100
5. Αναδυόμενες Τεχνολογίες	104
5.1 Το ηλιακό παράδοξο	104
5.2 Κβαντικά Φρεάτια Ηλιακών Κυψελών	109
5.3 Ηλιακές Κυψέλες Νανομετρικής Δομής.....	114
5.4 Ηλιακές Κυψέλες από Γραφένιο (Graphene).....	119
5.5 Ανορθωτικές Νανοκεραίες.....	123
Συμπεράσματα	133
Πίνακας Συντομεύσεων	134
Βιβλιογραφία – Πηγές	135

Πρόλογος

Το Internet δεν εφευρέθηκε από τη φορολόγηση του τηλεγράφου. Παρομοίως, δεν θα λαμβάνεται φθηνή και άφθονη ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο επιβάλλοντας φορολόγηση στους ρύπους (εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα) αλλά μάλλον με την εφεύρεση νέων, φθηνών ηλιακών συλλεκτών που θα είναι σε θέση να μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση μεγαλύτερη του 50%, αντί του σημερινού 22%.

Οι συλλέκτες αυτοί, επιπλέον, θα πρέπει να είναι εύκαμπτοι και με μικρό βάρος, ώστε να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με αξιοπιστία και ελάχιστη συντήρηση, καθώς θα μπορούν να ενσωματωθούν σε υπάρχοντα κτίρια, υφάσματα, σκηνές, ιστία, γυαλί και κάθε είδους επιφάνειες. Με τον τρόπο αυτό, η τιμή της ηλιακής ενέργειας θα μειωθεί στο επίπεδο τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από άνθρακα (η φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια) έτσι ώστε οι άνθρωποι που ζουν σε μεγάλες αναδυόμενες χώρες θα υιοθετήσουν σύντομα την ηλιακή ενέργεια για την οικονομική τους ανάπτυξη.

Τα καλά νέα είναι ότι η πρώτη γενιά αυτών των εμπορικών μονάδων - το θέμα αυτής της πτυχιακής - είναι τώρα έτοιμη και έχει εισέλθει στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά τα τελευταία χρόνια. Η αποδοτικότητά τους είναι ακόμη πολύ χαμηλή 5-15% και, παρά το σημαντικά χαμηλότερο κόστος από τις παραδοσιακές εγκαταστάσεις που βασίζονται στο πάνελ πυριτίου, θα πρέπει να επιτευχθεί πολύ υψηλότερη απόδοση μετατροπής. Ωστόσο δεν πρέπει να υπάρχει καμία αμφιβολία ότι αυτή η πρόοδος θα πραγματοποιηθεί.

Οι υψηλές τιμές του πετρελαίου τα τελευταία χρόνια και τα εμφανή σημάδια της κλιματολογικής αλλαγής είναι αρκετά για να βοηθήσουν την αγορά φωτοβολταϊκών τεχνολογιών που βασίζονται στις λεπτές ταινίες φωτοδραστικών υλικών που παρέμεναν αδρανή στα βιομηχανικά εργαστήρια για πολλά χρόνια.

Οι 12 δισεκατομμυρίων δολαρίων βιομηχανία φωτοβολταϊκών, που τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζει έναν εντυπωσιακό ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 35%, στρέφεται ταχύτατα στην αλλαγή των κλασικών φωτοβολταϊκών πάνελ πυριτίου σε φωτοβολταϊκά λεπτού φιλμ. Κατά ειρωνικό τρόπο, ο εφευρέτης της ηλιακής κυψέλης πυριτίου είχε ήδη από το 1954, σαφώς προβλέψει ότι τα φωτοβολταϊκά λεπτού Φιλμ θα διαμόρφωναν τις μελλοντικές κυψέλες στην βιομηχανία των φωτοβολταϊκών.

Από επιστημονική άποψη, οι νέες εύκαμπτες ηλιακές κυψέλες είναι το αποτέλεσμα της εξέλιξης της νανοτεχνολογίας και ιδιαίτερα της νανοχημείας. Πράγματι, η χημική ικανότητα να χειριστούμε την ύλη σε νανοκλίμακα για βιομηχανικές εφαρμογές, έχει καταστήσει δυνατή την σύνθεση φωτοδραστικών στρωμάτων που απαιτούνται για την πραγματοποίηση φωτοβολταϊκών μετατροπών, με την απαραίτητη σταθερότητα, για πρακτικές εφαρμογές.

Σχεδόν αθόρυβη μεταξύ των πιο διάσημων επιστημονικών κλάδων, η χημεία κατά την τελευταία 20ετία έχει επεκτείνει την ισχυρή συνθετική της μεθοδολογία για να κατασκευάζει υλικά που το μέγεθος και το σχήμα τους είναι τόσο σημαντικά όσο

και η δομή τους. Με άλλα λόγια, έχουμε μάθει πώς να κάνουμε σε νανοκλίμακα δομικά στοιχεία διαφορετικού μεγέθους και σχήματος, σύνθεσης και επιφανειακής δομής, που μπορεί να είναι χρήσιμα από μόνα τους ή σε μια αυτο-συναρμολογούμενη δομή

[1], όπως στην περίπτωση της "νάνο μελάνης" που αναπτύχθηκε από την Nanosolar (Κεφάλαιο 3) για τα CIGS (Copper Indium Gallium (di)Selenide, Cu(In,Ga)Se_2) πάνελ της, με παραγωγή ισχύος με λιγότερο από 1 \$ / W (δηλαδή, την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα).

Η πτυχιακή αυτή περιλαμβάνει αναφορά τόσο σε ανόργανα όσο και σε οργανικά φωτοβολταϊκά φιλμ με έμφαση στην προσέγγιση της νανοχημείας από την οποία αυτές οι συσκευές έχουν σχεδιαστεί και τελικά κατασκευαστεί.

Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός μαθαίνει ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα, οπού αυτό δεν είναι μια γνώμη, είναι μια πραγματικότητα που στις Η.Π.Α έχει χτυπήσει ήδη ολόκληρες πόλεις (Νέα Ορλεάνη), και στη Νότια Ευρώπη βλάπτει όχι μόνο τους ανθρώπους αλλά και ολόκληρο το οικοσύστημα με θερμοκρασίες κοντά στο 50°C στα μέσα Ιουνίου 2007.

Θα πρέπει να περιορίσουμε τις εκπομπές CO_2 σύντομα, και έτσι, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σε μαζική κλίμακα ανανεώσιμα υλικά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σε έντονη αντίθεση, για να ικανοποιήσουμε τις ενεργειακές μας ανάγκες, εξακολουθούμε να εξαρτόμαστε από την ενέργεια πηγών, τη μετατροπή τους και τις τεχνολογίες αποθήκευσης τους, που είναι 100 έως 150 ετών, ενώ σχεδόν κάθε άλλος τομέα της οικονομίας έχει μεταμορφωθεί. Για να πάρουμε μια ιδέα της απαξίωσης των ενεργειακών μας συσκευών, απλά ας σκεφτούμε πόσο συχνά επαναφορτίζουμε το κινητό μας τηλέφωνο και πόσο ρυπογόνες είναι οι μπαταρίες.

Ολόκληρη η βιομηχανία ενέργειας αντιστέκεται στις καινοτομίες χάρη στα τεράστια κέρδη που της εξασφαλίζουν η εξόρυξη υδρογονανθράκων και η διύλιση πετρελαίου. Με απλά λόγια, οι εταιρείες δεν έχουν κανένα λόγο να επενδύσουν στην αλλαγή αυτής της «ειδυλλιακής» κατάστασης, και σχεδόν σε κάθε εναλλακτική πηγή ενέργειας που έχουμε - ηλιακή, αιολική, πυρηνική ενέργεια, κυψέλες καυσίμου – έχει προκύψει από καινοτομίες χρηματοδοτούμενες από φορολογούμενους.

Όλα αυτά όμως αλλάζουν για πάντα.

Σήμερα, όχι μόνο η τιμή του πετρελαίου έχει φτάσει αλλά και ξεπεράσει το όριο των 100 δολαρίων ανά βαρέλι, αλλά και η απόδοση της ενέργειας προς την ενέργεια που επενδύεται (EROI) μειώνεται ταχύτατα. Λαμβάνοντας υπόψη τις ΗΠΑ, για παράδειγμα, η EROI έχει συρρικνωθεί στα 15 joules ανά joule επένδυσης, ενώ στη δεκαετία του 1930 ο αριθμός ήταν 100 joules ανά joule [2].

Με την ίδια λογική, η Ιταλική εταιρία πετρελαίου Eni είναι, μαζί με τη Shell, Total και ExxonMobil μεταξύ των εταιρειών που κατέχουν τα δικαιώματα για την εκμετάλλευση των νέων τεράστιων κοιτασμάτων πετρελαίου του Κασαγκάν στο Καζακισταν. Δυστυχώς, αυτό το πετρέλαιο βρίσκεται κάτω από μία μεγάλη ποσότητα υδρόθειου που, ακόμη και αν οι εταιρείες καταφέρουν να επιλύσουν τα τεχνικά

προβλήματα και να αρχίσουν τις γεωτρήσεις, η τιμή των εφαρμοζόμενων λύσεων αναπόφευκτα θα πρέπει να αντικατοπτρίζεται σε σημαντικά χαμηλότερη EROI και υψηλότερο κόστος.

Είναι ακριβώς αυτή η πτωτική τάση στην EROI όπου μαζί με την κλιματική αλλαγή που οφείλεται στην αύξηση των επιπέδων του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, αναγκάζει την κοινωνία σε παγκόσμιο επίπεδο να μετακινηθεί από τις ορυκτές σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέχρι την ημέρα όπου η φθηνή και άφθονη ηλιακή ενέργεια θα γίνει πραγματικότητα.

Μαζί με τα συμφέροντα πολιτών, εταιρειών και κυβερνήσεων, ιδιωτικές και δημόσιες επενδύσεις στον τομέα της ηλιακής ενέργειας είναι τελικά σε άνθηση. Πολυάριθμες νεοεμφανιζόμενες εταιρίες φωτοβολταϊκών προσελκύουν οικονομικές επενδύσεις από κορυφαίους επενδυτές, ακόμη και από εταιρείες πετρελαίου. Η Google, για παράδειγμα, σε μεγάλο βαθμό χρηματοδοτεί την Nanosolar στις ΗΠΑ, ενώ στους επενδυτές του Koparka, ένας κατασκευαστής πλαστικών ηλιακών κυψελών, περιλαμβάνονται μερικές από τις μεγαλύτερες πετρελαϊκές εταιρείες στον κόσμο.

Παρομοίως, πιστεύουμε ότι η ισλαμική χρηματοδότηση θα διαδραματίσει καίριο ρόλο στη άφθονη, φθηνή και καθαρή ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια να γίνει μια πραγματικότητα για την ανθρωπότητα. Αυτοί οι ίδιοι οι επενδυτές, οι πολιτικοί και οι σύμβουλοί τους θα βρουν σε αυτήν την πτυχιακή πολλές πληροφορίες στις οποίες θα μπορούν να βασίσουν τις επιλογές τους.

Δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι που δεν έχουν πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο θα επωφεληθούν πάρα πολύ από τις προόδους που γίνονται, καθώς και οι εταιρείες και οι πολίτες στις αναπτυσσόμενες χώρες του κόσμο όπου ο λογαριασμός του ηλεκτρικού ρεύματος έχει γίνει ένα σοβαρό οικονομικό πρόβλημα.

Η πτυχιακή αυτή εργασία-έρευνα εξετάζει την ανάγκη να παράσχει, λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με διαφορετικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών λεπτού φιλμ που θα τύχουν γρήγορα ευρείας χρήσης. Θεωρούμε δεδομένη την «στροφή» της βιομηχανίας Φ/Β σε μονάδες λεπτού Φιλμ μιας και παρουσιάζουν ευκολότερη-μαζικότερη βιομηχανική παραγωγή, χαμηλότερο κόστος άλλα παράλληλα εξελίσσονται ραγδαία και πλησιάζουν σε επιδόσεις τα κλασσικά Φ/Β πάνελ πυριτίου. Έτσι λοιπόν η έρευνα μας επικεντρώνεται στις νέες τεχνολογίες (Φ/Β λεπτού φιλμ) με την χρήση υπερσύγχρονων τεχνολογιών (αρχιτεκτονική νανοδομή – νανοχημεία).

1. Φωτοβολταϊκά

1.1 Η ανάγκη για φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Οι ανάγκες της κοινωνίας μετά την βιομηχανική επανάσταση, άλλαξαν δραματικά, με την εξ' ολοκλήρου πλέον εξάρτησή της από την παραγωγή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βέλτιστος τρόπος παραγωγής, μέχρι και λίγες δεκαετίες πριν, ήταν η καύση του ορυκτού πλούτου του φλοιού του πλανήτη. Αυτή η μέθοδος όμως, εκτός από τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, άρα άμεσα και στην ποιότητα ζωής του ανθρώπου, αγνόησε το γεγονός ότι τα αποθέματα ορυκτών έχουν πεπερασμένη ποσότητα.

Η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, πολλαπλασιάστηκε με την πάροδο των χρόνων και μέσα σε 200 χρόνια καταναλώθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό των διαθέσιμων πόρων, επιτρέποντας την εκμετάλλευσή τους για 40-50 χρόνια ακόμα έως την εξάντλησή τους. Η απάντηση στο ενεργειακό πρόβλημα που προκύπτει, δίνεται από νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, που δεν στηρίζονται σε ρυπογόνες μεθόδους εκμετάλλευσης πεπερασμένων πόρων, αλλά σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως ο άνεμος, η βιομάζα, το νερό, ο ήλιος και άλλα. Ο ήλιος, εκτός από πηγή φωτός και θερμότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, στηρίζεται στην ιδιότητα ορισμένων στοιχείων του περιοδικού πίνακα να εμφανίζουν ηλεκτρική τάση στα άκρα τους όταν προσπίπτει στην επιφάνειά τους φως.

1.2 Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών

Οι πρώτες παρατηρήσεις πάνω στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, έγιναν από τον 19χρονο τότε Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel το 1839 ο οποίος ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς πειραματιζόταν με ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό στο οποίο η ροή αυξανόταν με την έκθεση στον ήλιο. Οι σημειώσεις του γύρω από το φαινόμενο, είχαν φανεί πολύ ενδιαφέρουσες στην επιστημονική κοινότητα αλλά χωρίς πρακτική εφαρμογή.

Το 1876 ο Willoughby Smith με τον μαθητή του Williams Adams παρατηρεί ένα ακόμη φαινόμενο, παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, μετά την έκθεση σεληνίου (Se) στον ήλιο. Η ανακάλυψη αυτή ήταν πολύ σημαντική αφού πλέον είχε αποδειχθεί ότι ένα στοιχείο μπορούσε να μετατρέψει το φως σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς

θέρμανση και χωρίς κινούμενα μέρη. Το 1883 ο Αμερικανός εφευρέτης Charles Fritz παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 1-2% από φύλλα σεληνίου.

Το 1918 Ο Πολωνός Jan Czochralski κατασκευάζει το πρώτο στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με μία μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα κ σήμερα. Το σημαντικότερο βήμα στην εξέλιξη της Φ/Β τεχνολογίας έγινε την άνοιξη του 1953 όταν οι επιστήμονες της Bell Laboratories Gerald Pearson, Daryl Chapin και Calvin Fuller, καθώς ερευνούσαν το στοιχείο πυρίτιο (Si) για πιθανές εφαρμογές στην ηλεκτρονική, εφηύραν το πρώτο Φ/Β στοιχείο το οποίο ήταν πολύ πιο αποδοτικό από τα παλιότερα στοιχεία φτιαγμένα από σελήνιο. Η Bell Telephone Laboratories σχεδίασε λίγο αργότερα Φ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 4%. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για νέα επιτεύγματα στον κλάδο, με διαρκώς αυξανόμενες αποδόσεις, νέες μεθόδους παραγωγής Φ/Β στοιχείων και χρήση διαφορετικών υλικών από το πυρίτιο. Η τεχνολογία αυτή, βρήκε εφαρμογή αρχικά στην τροφοδότηση διαστημικών δορυφόρων όπως ο δορυφόρος Vanguard I .

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν να κάνουν την εμφάνιση τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των Φ/Β συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος πελάτης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν είναι η NASA. Οι υψηλές τιμές στα φωτοβολταϊκά ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε περισσότερο ενθουσιώδης αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμή των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια, το 1970 αγγίζει τα 100\$/Watt. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50\$/Watt.

Η πρώτη εγκατάσταση Φ/Β που φτάνει στα επίπεδα του 1MW γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων. Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$. Το 1999 η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το National Renewable Energy Laboratory (NREL) των Η.Π.Α. αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32.3%. Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση των Thin Films φτάνει στο 18.8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των Φ/Β πλαισίων φτάνει συνολικά τα 200 MW. Από το 2004 και μετά, η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των Φ/Β φέρνει την μαζική παραγωγή και αυτή με την σειρά της την τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων στα 6.5 €/Wp. Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή Φ/Β πλαισίων και πλέον σε όλες τις αναπτυσσόμενες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή Φ/Β εγκαταστάσεων) , να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MW ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$. Σήμερα με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως

υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

1.3 Πώς Λειτουργούν οι Ηλιακές Κυψέλες

Μία φωτοβολταϊκή (Φ/Β) κυψέλη μετατρέπει το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σε μια μεταλλική επιφάνεια, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται μόλις η ενέργεια υπερβεί την ενέργεια δεσμού. Σε μία ηλιακή κυψέλη, συστήνεται μια ασυμμετρία από την επαφή δύο ημιαγωγών με αντίθετη πολικότητα η οποία οδηγεί τα ηλεκτρόνια, που έχουν απελευθερωθεί από το προσπίπτον φως, σε ένα κύκλωμα (Διάγραμμα 1.1).

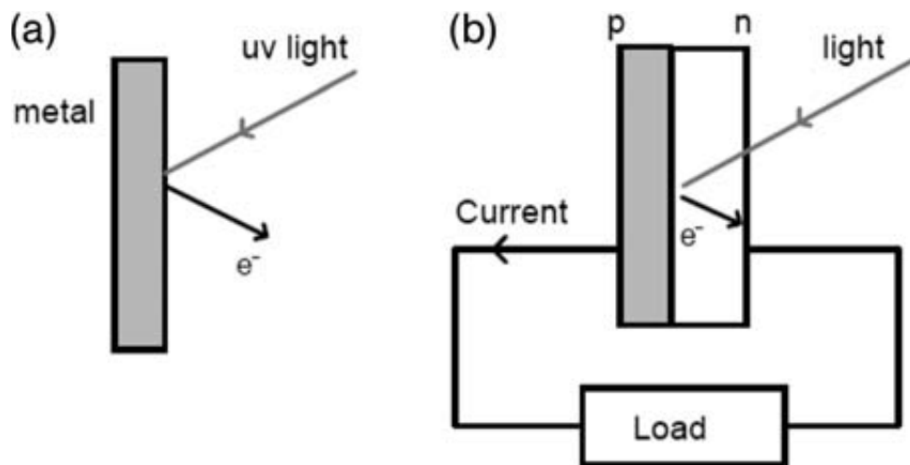
Μια συμβατική ηλιακή κυψέλη (Σχήμα 1.2) αποτελείται από δύο στρώματα ημιαγωγών, ένα θετικό (p-τύπου) και ένα αρνητικό (n-τύπου) οι οποίοι έχουν συγκολληθεί για να σχηματίσουν μία δομή-επαφή τύπου p-n.

Όταν ο ημιαγωγός εκτίθεται στο φως, η ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων που υπερβαίνει το όριο της διάκενης ζώνης, απορροφάται από τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού που περνούν στη ζώνη αγωγιμότητας του και έτσι ξεκινά η αγωγή ηλεκτρισμού. Τα ηλεκτρόνια των ημιαγωγών, στην πραγματικότητα, έχουν αδύναμο δεσμό με τον πυρήνα του ατόμου και καταλαμβάνουν την ενεργειακή ζώνη σθένους.

Για κάθε αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο, δημιουργείται ένα αντίστοιχο θετικό φορτίο, οπή. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές κοντά στην επαφή τύπου p / n σαρώνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις από την δράση του ηλεκτρικού πεδίου, όπου μια επαφή οδηγεί αυτά τα ηλεκτρόνια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, όπου χάνουν την ενέργεια τους, παράγοντας έργο όπως την τροφοδοσία μίας πηγής φωτός, και στη συνέχεια επιστρέφουν στη ζώνη σθένους του υλικού μέσω μιας δεύτερης επιλεκτικής επαφής κλείνοντας έτσι το κύκλωμα. (Σχήμα 1.3).

Μόνο τα φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια διάκενης ζώνης (E_G), είναι σε θέση να δημιουργήσουν ένα ζεύγος ηλεκτρόνιο-οπή (Εικόνα 1.4) και έτσι να συμβάλλει στην διαδικασία μετατροπής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η φασματική φύση του φωτός του ήλιου είναι μια θεμελιώδης πτυχή που επηρεάζει το σχεδιασμό αποδοτικών ηλιακών κυψελών (Εικόνα 1.5).

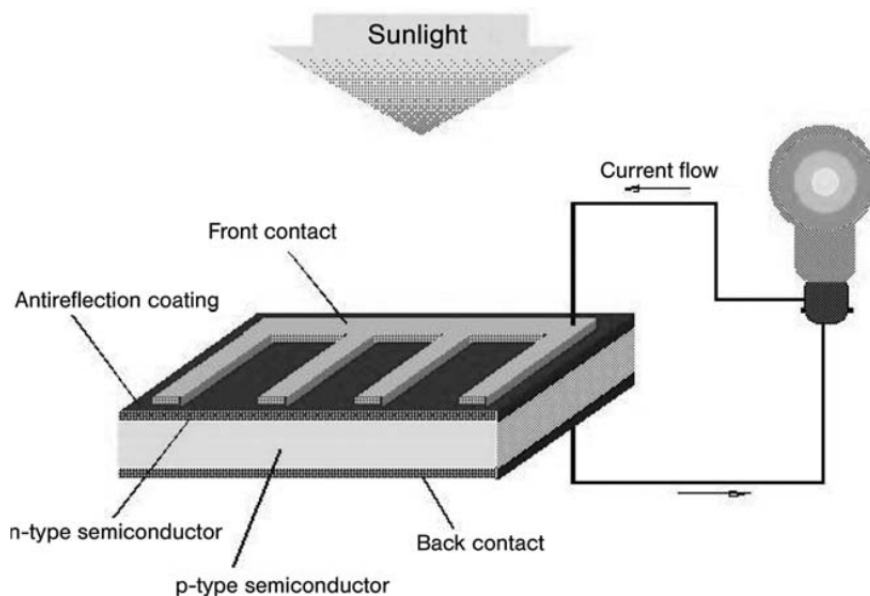
Η ηλιακή κυψέλη είναι η δομική μονάδα των φωτοβολταϊκών. Συνήθως, είναι κατασκευασμένη από «φέτα» πυριτίου 100 cm^2 των οποίων η επιφάνεια έχει υποστεί επεξεργασία ώστε να μεγιστοποιεί την απορρόφηση του φωτός και έτσι φαίνεται σκούρα μπλε ή μαύρη. Μια τέτοια κυψέλη που δέχεται ακτινοβολία από τον ήλιο δημιουργεί δεκάδες μιλιμπέρ (mA) ανά cm^2 που προκαλείται από μια διαφορά δυναμικού της τάξης των 0,5 έως 1 V, το οποίο είναι πολύ χαμηλό για τις περισσότερες εφαρμογές.



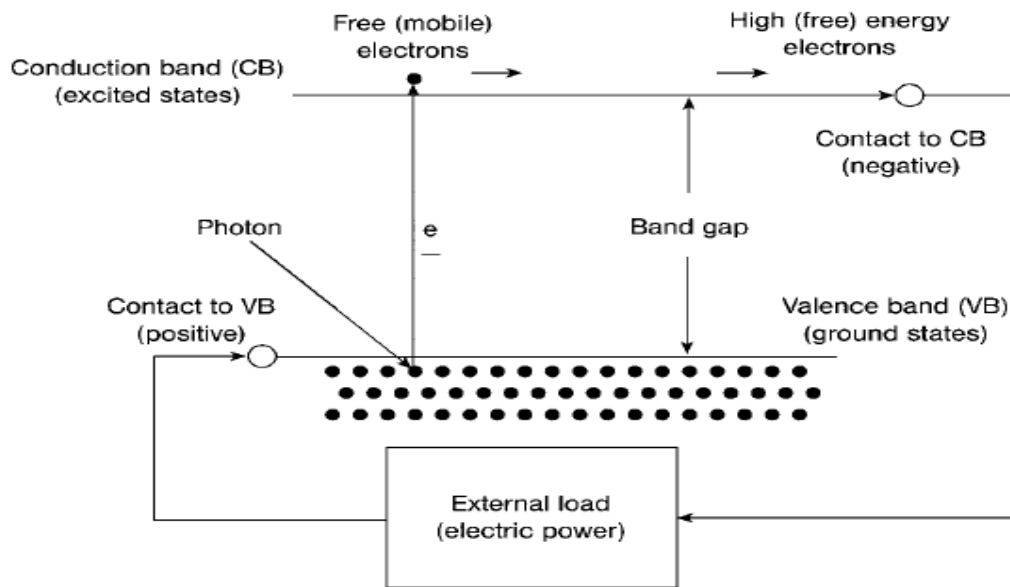
Σχήμα 1.1 Ασυμμετρία σε μία ηλιακή κυψέλη (b) οδηγεί τα ηλεκτρόνια, τα οποία ελευθερώθηκαν από το προσπίπτον φως, στο κύκλωμα. Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην μεταλλική επιφάνεια, ελευθερώνονται ηλεκτρόνια όταν η ενέργεια ξεπεράσει την ενέργεια δεσμού τους.

Οι κυψέλες είναι συνδεδεμένες σε σειρά σε μια μονάδα (χρησιμοποιώντας κατάλληλη ομαδοποίηση για να αποφευχθεί πλήρης βλάβη σε περίπτωση βλάβης μίας κυψέλης), η οποία κατά κανόνα περιέχει 28-36 κυψέλες για την παραγωγή τάσης εξόδου 12V σε κανονικές συνθήκες φωτισμού. Περαιτέρω οι μονάδες είναι σε παράλληλη διάταξη, σε συστοιχίες («πάνελ») όπως τις συναντάμε στην αγορά.

Για να τροφοδοτήσουμε συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και να συνδεθούν με το δίκτυο, συνδέουμε το πάνελ σε αναστροφέα (inverter). Μία ηλιακή κυψέλη μπορεί να αντικαταστήσει έτσι μια μπαταρία σε ένα κύκλωμα (Σχήμα 1.6).

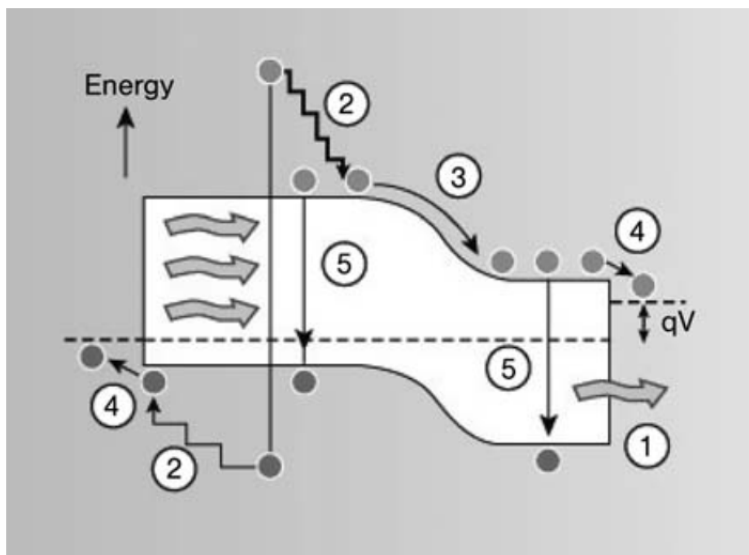


Σχήμα 1.2 Μία Φ/Β κυψέλη κάτω από φωτισμό δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο, καθώς τα ηλεκτρόνια κινούνται προς τη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας τις σπές πίσω στο υλικό.

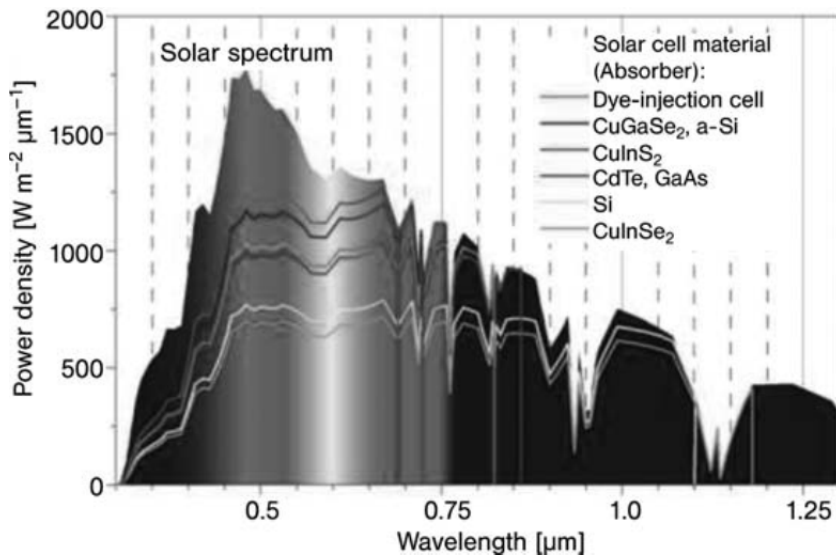


Σχήμα 1.3 Σχέση μεταξύ της ενέργειας και των χωρικών ορίων σε μία ηλιακή κυψέλη.

Η τάση V_{OC} που αναπτύσσεται όταν οι πόλοι είναι απομονωμένοι ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος. Η ένταση ρεύματος I_{SC} που διαρρέει το κύκλωμα όταν οι πόλοι είναι συνδεδεμένοι, ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Για κάθε ενδιάμεση αντίστασης φορτίου R_L , το κύκλωμα αναπτύσσει τάση μεταξύ 0 και V_{OC} και δίδει ένα ρεύμα I , έτσι ώστε $V = IR_L$ και I καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά τάσης-ρεύματος της κυψέλης.



Σχήμα 1.4 Διαδικασίες απωλειών σε μια τυπική ηλιακή κυψέλη: (1) μη απορρόφηση φωτονίων με χαμηλότερη ενέργεια από το διάκενο ζώνης του ημιαγωγού (2) απώλεια πλέγματος σωματιδίων που επιτυγχάνουν θερμική ισορροπία μέσω της αμοιβαίας αλληλεπίδρασης (3) και (4) απώλεια τάσης ένωσης και επαφής (5) απώλεια ανασυνδυασμού.

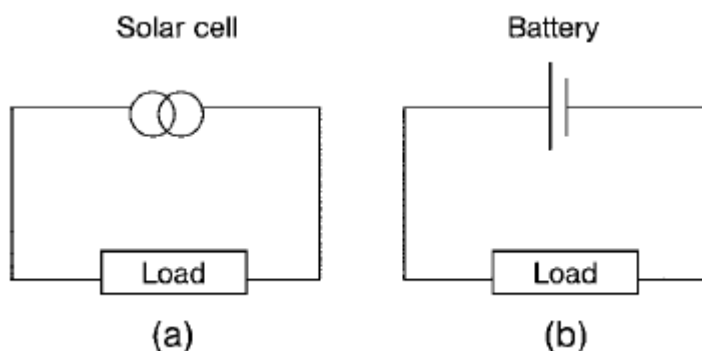


Σχήμα 1.5 Το ηλιακό φάσμα του ηλιακού φωτός σε συνδυασμό με το προφίλ κβαντικής απόδοσης των ημιαγωγών που συνήθως χρησιμοποιούμε σε ηλιακές κυψέλες. (Εικόνα: Hahn-Meitner-Institut Βερολίνο).

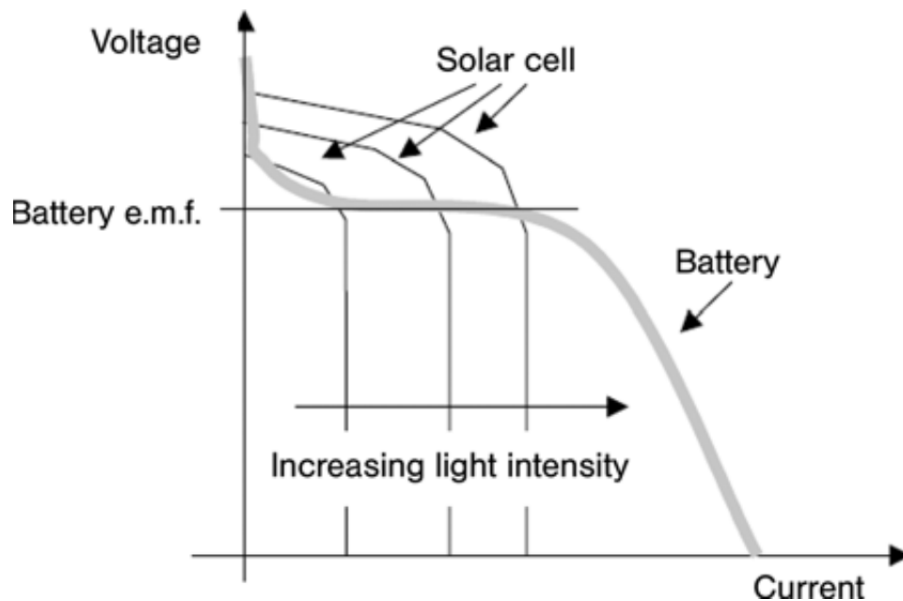
Δεδομένου ότι το ρεύμα είναι περίπου ανάλογο με τη φωτισμένη περιοχή, η σχετική παράμετρος για σύγκριση είναι η ένταση ρεύματος J_{SC} . Η ισχύς που παρέχεται σε ένα φορτίο από μια μπαταρία είναι σχετικά σταθερή, ενώ η ισχύς που αποδίδεται από ένα ηλιακό κύτταρο εξαρτάται από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός και όχι από το φορτίο (Σχήμα 1.7).

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) προέρχεται στην πραγματικότητα από μια προσωρινή αλλαγή του ηλεκτροχημικού δυναμικού που προκαλείται από το φως. Η πυκνότητα ρεύματος έχει σχέση με το προσπίπτον φάσμα μέσω της κβαντικής αποτελεσματικότητας της κυψέλης $QE(E)$, που είναι η πιθανότητα ότι ένα φωτόνιο ενέργειας $E = h \cdot \nu$ προκαλεί μετάβαση ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα. Τότε:

$$J_{SC} = q \cdot \int b_S(E) \cdot QE(E) \cdot dE, \quad (1.1)$$



Σχήμα 1.6 Μία ηλιακή κυψέλη μπορεί να αντικαταστήσει έτσι μια μπαταρία σε ένα κύκλωμα.



Σχήμα 1.7 Μία μπαταρία είναι ουσιαστικά μια πηγή τάσης ενώ μία ηλιακή κυψέλη είναι μια πηγή ρεύματος, ενώ η μπαταρία παρέχει μία σταθερή τάση σε σχεδόν κάθε τιμή έντασης ρεύματος (μέχρι να εξαντληθεί από αποφόρτιση), η ηλιακή κυψέλη δίδει ένα σταθερό ρεύμα για κάθε δεδομένο επίπεδο φωτισμού και η τάση καθορίζεται από την αντίσταση του φορτίου.

Όπου q είναι το φορτίο των ηλεκτρονίων, και $b_s(E)$ είναι η πυκνότητα ροής των προσπιπτόντων φωτονίων, δηλαδή ο αριθμός των φωτονίων της ενέργειας $E + dE$ τα οποία προσπίπτουν σε μονάδα επιφάνειας σε μονάδα χρόνου.

Έτσι, όπως το J_{SC} επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση του γινομένου της πυκνότητας και της κβαντικής αποτελεσματικότητας QE φωτονίου στην ενέργεια φωτονίου, είναι επιθυμητό να έχει υψηλή κβαντική απόδοση στην ενέργεια, όπου η πυκνότητα φωτονίου είναι υψηλή. Η QE του υλικού κυψέλης (Σχήμα 1.5) με τη σειρά της εξαρτάται από την (i) την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού φορτίων, (ii) την απορροφητική ικανότητα του υλικού και (iii) την αποτελεσματικότητα συλλογής φορτίων στην συσκευή.

Το καθεστώς λειτουργίας της ηλιακής κυψέλης είναι εντός του εύρους πόλωσης μεταξύ 0 και V_{OC} εντός του οποίου η κυψέλη παρέχει ισχύ. Και η πυκνότητα ισχύος P της κυψέλης είναι:

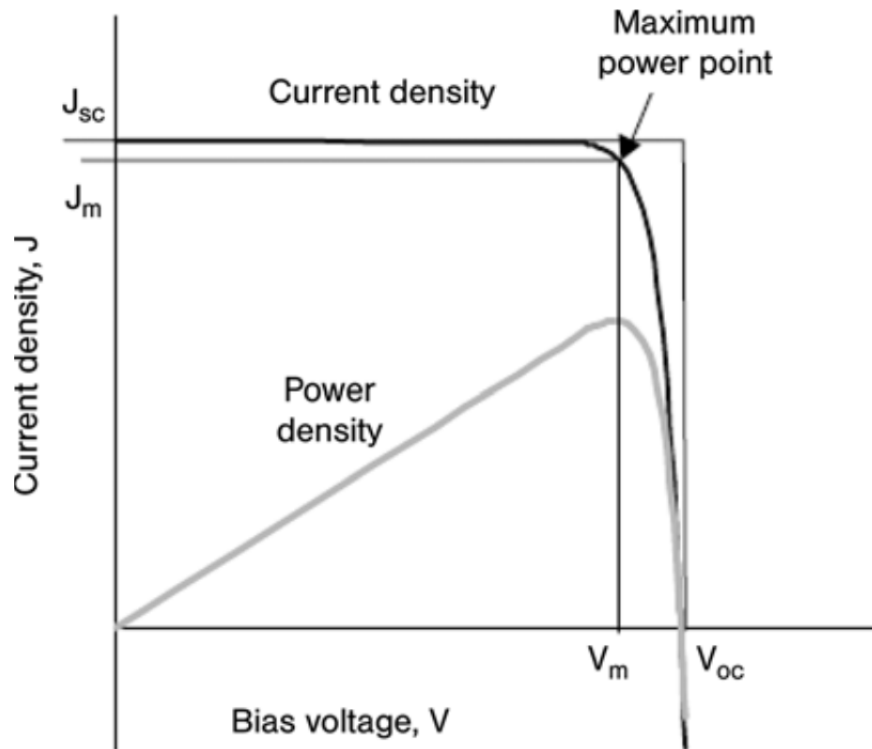
$$P = J \cdot V, (1.2)$$

Η πυκνότητα P φτάνει σε P_{max} στο σημείο λειτουργίας της κυψέλης ή της μέγιστης της ισχύος της. Αυτό συμβαίνει για τάση V_m με αντίστοιχη ένταση ρεύματος J_m όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.

Ο συντελεστής πλήρωσης **FF** ορίζεται ως ο λόγος:

$$FF = \frac{J_m \cdot V_m}{J_{sc} \cdot V_{oc}}, (1.3)$$

Έτσι ο συντελεστής FF περιγράφει την γωνιοπιστότητα, (την απόκλιση ορθογωνικότητας), της καμπύλης J-V.



Σχήμα 1.8 Οι χαρακτηριστικές καμπύλες έντασης-τάσης (μαύρη) και ισχύος-τάσης (γκρι) μιας ιδανικής ηλιακής κυψέλης. Η καμπύλη ισχύος-τάσης φτάνει στο μέγιστο για μια τιμή τάσης πόλωσης V_m κοντά στην τιμή V_{oc} . Η μέγιστη πυκνότητα ισχύος $J_m \times V_m$ δίνεται από το εμβαδό του εσωτερικού ορθογωνίου. Το εμβαδό του εξωτερικού τριγώνου μας δίνει $J_{sc} \times V_{oc}$. Αν ο συντελεστής πλήρωσης FF είναι ίσος με τη μονάδα, η καμπύλη έντασης-τάσης ακολουθεί το εξωτερικό τρίγωνο.

Η αποδοτικότητα μιας κυψέλης είναι η πυκνότητα ισχύος που εξάγεται στο σημείο λειτουργίας του ως κλάσμα της πυκνότητας ισχύος του προσπίπτοντος φωτός, P_s ,

$$\eta = \frac{J_m \cdot V_m}{P_s}, (1.4)$$

Η αποδοτικότητα η σχετίζεται με το J_{sc} και το V_{oc} μέσω του συντελεστή πλήρωσης FF,

$$\eta = \frac{J_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_s}, (1.5)$$

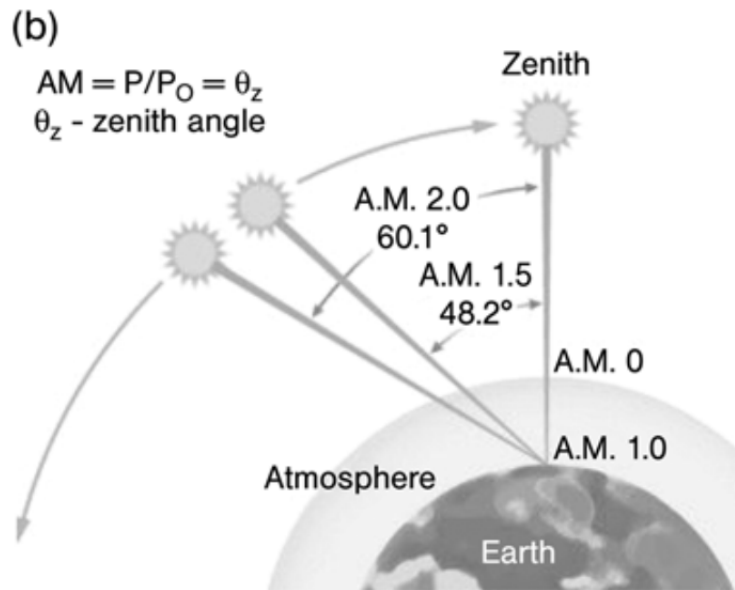
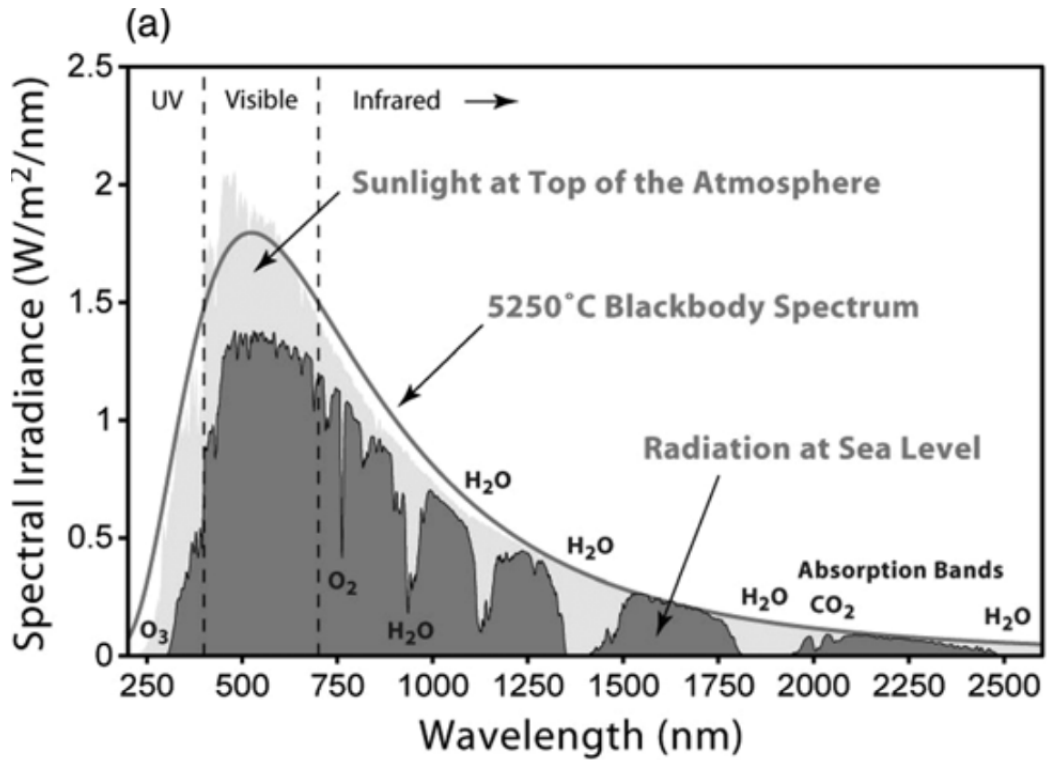
Τα τέσσερα αυτά μεγέθη J_{SC} , V_{OC} , FF και η , καθορίζουν την απόδοση μιας ηλιακής κυψέλης, συνεπώς αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά της.

Για την αποτελεσματική σύγκριση, πρέπει κατά συνέπεια όλα να εκφράζονται υπό στάνταρ συνθήκες φωτισμού. Η τυπική κατάσταση δοκιμής (**STC**) για τις ηλιακές κυψέλες, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό και τα υλικά, είναι το φάσμα οπτικής μάζας (Air Mass) 1,5 (AM 1.5G), μια εφαρμοζόμενη πυκνότητα ισχύος $1000 W \cdot m^{-2}$, η οποία ορίζεται ως το πρότυπο «1 ηλίου» (“1 sun”), σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία 25°C (Σχήμα 1.9). Ως AM0 ορίζεται η ακτινοβολία στο διάστημα ή σε μηδενική ατμόσφαιρα. Η AM1 αναφέρεται στον Ήλιο που βρίσκεται ακριβώς κατακόρυφα στο επίπεδο του γήινου παρατηρητή. Η AM1.5G αποτελεί ένα τυπικό ηλιακό φάσμα στην επιφάνεια της Γης σε μια ηλιόλουστη μέρα και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει του ηλιακούς συλλέκτες.

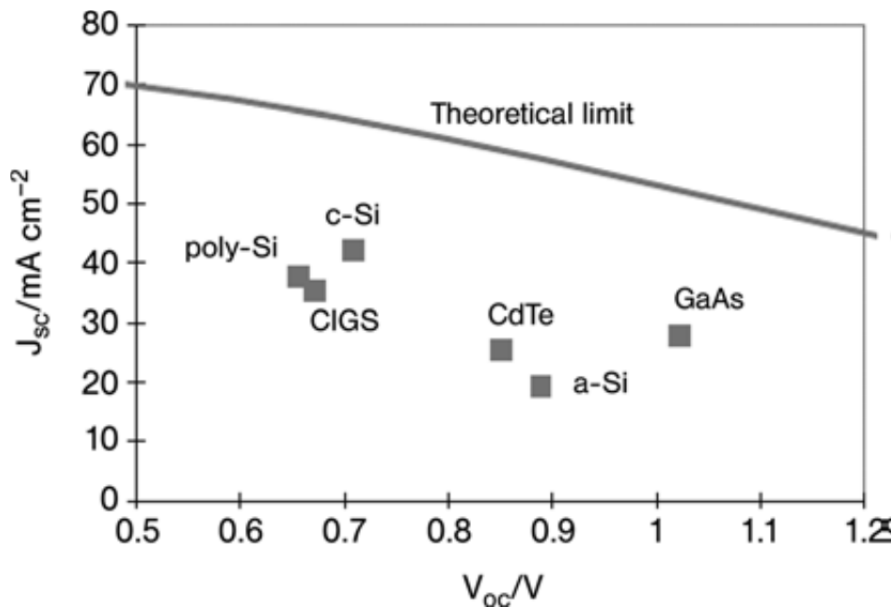
Πρέπει να τονιστεί ότι η μέση πυκνότητα ηλιακής ισχύος στη Γη είναι $170 W \cdot m^{-2}$, δηλαδή το ένα έκτο του προτύπου πυκνότητας που επιλέξαμε για την σύγκριση της αποδοτικότητας των ηλιακών κυψελών.

Αυτό πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε υπόψη σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές, καθώς η απόδοση των συμβατικών κυψελών μειώνεται γρήγορα σε χαμηλότερες πυκνότητες ισχύος, και οι κυψέλες με χαμηλή ονομαστική απόδοση μπορούν να προσφέρουν σημαντικά μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, σε σχέση με τις ομόλογες κυψέλες, όπου οφείλεται στην καλύτερη απόδοση σε συνθήκες χαμηλής έντασης φωτισμού και υψηλότερης θερμοκρασίας.

Στο σχήμα 1.10 απεικονίζεται ο συσχετισμός μεταξύ της J_{SC} και της V_{OC} , μαζί με την σχέση μέγιστης αποδοτικότητας για μία κυψέλη. Οι τιμές στον πίνακα 1.1 για την κύρια ηλιακή κυψέλη, δείχνουν ότι οι κυψέλες με υψηλότερη J_{SC} τείνουν να έχουν χαμηλότερη V_{OC} . Αυτή είναι μια συνέπεια του ενεργειακού κενού του υλικού των ημιαγωγών. Σε γενικές γραμμές, σε πρακτικές Φ/Β εφαρμογές, γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ του φωτορεύματος και της τάσης.



Σχήμα 1.9 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την ατμόσφαιρα και σε επιφάνεια (α). Η τιμή Οπτικής Μάζας AM 0 (β) ισοδυναμεί με ηλιοφάνεια στο επίπεδο της θάλασσας με τον Ήλιο στο ζενίθ του. AM 1,0 αναπαριστά ηλιοφάνεια με τον Ήλιο στο ζενίθ του, πάνω από την γήινη ατμόσφαιρα όπου απορροφά οξυγόνο και αέρια αζώτου. AM 1,5 είναι το ίδιο, αλλά με τον Ήλιο σε μια πλάγια γωνία 48.2°, το οποίο προσομοιώνει μεγαλύτερη οπτική διαδρομή μέσω της γήινης ατμόσφαιρας, AM 2,0 επεκτείνει αυτήν την λοξή γωνία σε 60,1°. (Εικόνα από LaserFocusWorld).



Σχήμα 1.10 Καμπύλη της $J_{sc} - V_{oc}$ για τις κυψέλες που παρατίθενται στον πίνακα 1.1. Λόγω του ενεργειακού κενού, υλικά με υψηλή V_{oc} τείνουν να έχουν χαμηλότερο J_{sc} .

Πίνακας 1.1 Επιδόσεις ορισμένων τύπων Φ/Β κυψελών

Cell type	Area (cm ²)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mAcm ²)	FF	Efficiency (%)
crystalline Si	4.0	0.706	42.2	82.2	24.7
crystalline GaAs	3.9	1.022	28.2	87.1	25.1
poly-Si	1.1	0.654	38.1	79.5	19.8
a-Si	1.0	0.887	19.4	74.1	12.7
CuInGaSe ₂	1.0	0.669	35.7	77.0	18.4
CdTe	1.1	0.848	25.9	74.5	16.4

1.4 Η Ηλιακή Κυψέλη: Μια Γεννήτρια Ρεύματος

Στην πράξη, όταν έχουμε παρουσία φορτίου, αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών της κυψέλης. Το δυναμικό αυτό δημιουργεί ένα ρεύμα το οποίο ενεργεί προς την αντίθετη κατεύθυνση του φωτορεύματος, και το καθαρό ρεύμα μειώνεται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αυτό το αντίθετο ρεύμα ονομάζεται σκοτεινό ρεύμα, σε αναλογία με το ρεύμα I_{dark} που διαρρέει όλη την συσκευή υπό την εφαρμογή τάσης, ή πόλωσης, V , στο σκοτάδι.

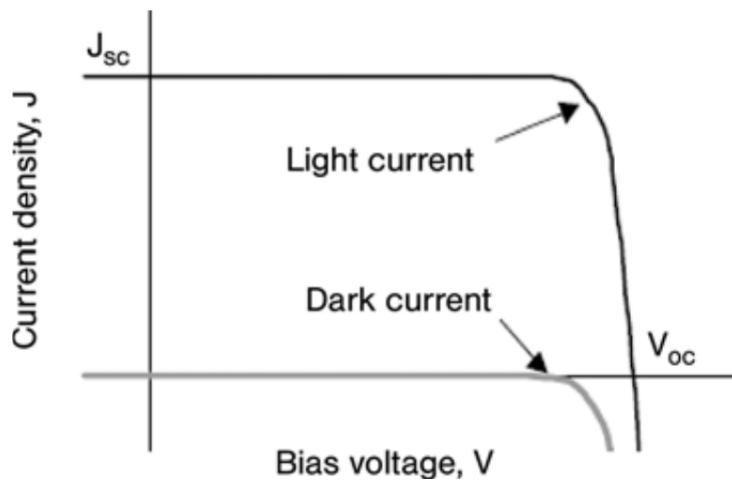
Οι περισσότερες ηλιακές κυψέλες συμπεριφέρονται ως μια δίοδος στο σκοτάδι, δέχονται ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα υπό θετική πόλωση ($V > 0$) από ό, τι υπό ανάστροφη πόλωση ($V < 0$). Για μια ιδανική δίοδο, η πυκνότητα σκοτεινού ρεύματος ποικίλλει:

$$J_{dark} = J_o \cdot (e^{qV/k_B \cdot T} - 1) \quad (1.6)$$

Όπου k_B σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία και J_o σταθερά. Έτσι η ροή καθαρού ρεύματος σε ένα κύκλωμα που τροφοδοτείται από μία ηλιακή κυψέλη είναι:

$$J(V) = J_{SC} - J_{dark} \quad (1.7)$$

$$J(V) = J_{SC} - J_o \cdot (e^{qV/k_B \cdot T} - 1) \quad (1.8)$$



Σχήμα 1.11 Καμπύλη $J_{SC} - V_{OC}$ για μια ιδανική δίοδο στο σκοτάδι και με φωτισμό.

Όταν απομονωθούν οι επαφές η διαφορά δυναμικού έχει τη μέγιστη τιμή της, V_{OC} , η οποία είναι ισοδύναμη με την κατάσταση κατά την οποία το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και το «σκοτεινό» ρεύμα εξισώνονται ($J_{SC} - J_{dark} = 0$). Επομένως, για μια ιδανική δίοδο θα έχω:

$$V_{OC} = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \frac{\ln(J_{SC} + 1)}{J_o} \quad (1.9)$$

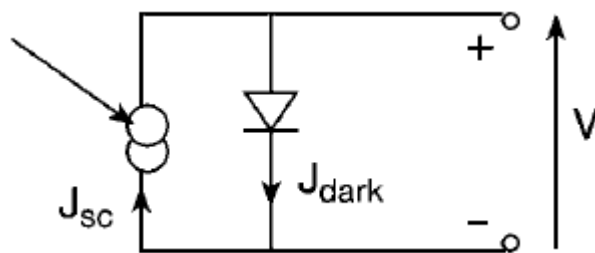
Με άλλα λόγια η V_{OC} αυξάνει λογαριθμικά (ως εκ τούτου πολύ αργά) με την ένταση του φωτός.

Το σχήμα 1.11 δείχνει ότι η κυψέλη παράγει ισχύ όταν η τάση είναι μεταξύ 0 και V_{OC} . Στο $V < 0$ η κυψέλη λειτουργεί ως φωτοανιχνευτής, καταναλώνοντας ενέργεια για να δημιουργήσει φωτορεύμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, με την δίοδο σε αυτήν την κατάσταση, το σκοτεινό ρεύμα σε ηλιακές κυψέλες συνοδεύεται από εκπομπή φωτός.

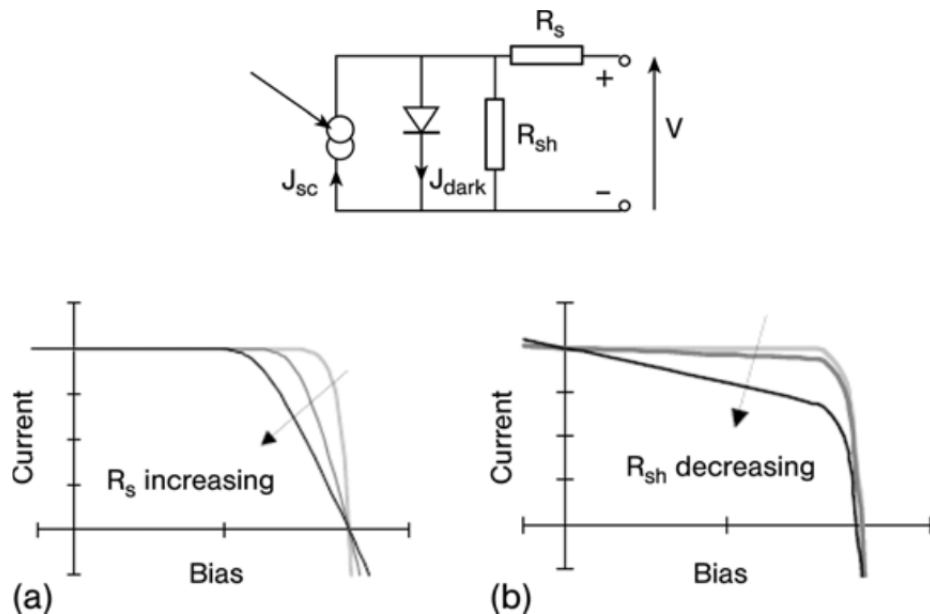
Ηλεκτρικά, ως εκ τούτου, η ηλιακή κυψέλη είναι ισοδύναμη με μια γεννήτρια ρεύματος, συνδεδεμένη παράλληλα με μία δίοδο αντίστασης (σχήμα 1.12). Είναι αυτή η δίοδος, που καθιερώνει μια φωτοτάση επιτρέποντας φωτορεύμα μέσω φορτίου.

Όταν ανάβει (φωτοεκπέμπει), η ηλιακή κυψέλη παράγει ένα φωτορεύμα ανάλογο με την ένταση του φωτός. Αυτό το φωτορεύμα χωρίζεται στο φορτίο και στη δίοδο με λόγο που εξαρτάται από την αντίσταση του φορτίου και την ένταση του φωτός.

Σε πραγματικές κυψέλες, η ισχύς απάγεται μέσω της αντίστασης επαφών όσο και μέσω ρευμάτων διαρροής γύρω από τις πλευρές της συσκευής. Ηλεκτρικά, αυτά τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε δύο «παρασιτικές» αντιστάσεις σε σειρά (R_s) και μια παράλληλη (R_{sh}), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13:



Σχήμα 1.12 Η ηλιακή κυψέλη είναι ισοδύναμη με μια γεννήτρια ρεύματος, παράλληλα με μια δίοδο αντίστασης.



Σχήμα 1.13 Επίδραση της (α) αύξηση της αντίστασης σε σειρά και (β) μείωση της παράλληλης αντίστασης στην καμπύλη ρεύμα-τάση. Και στις δύο περιπτώσεις, η εξωτερική καμπύλη έχει $R_s=0$ και $R_{sh}=\infty$. Στην πράξη, το αποτέλεσμα της απόκλισης, από αυτή την ιδανική συμπεριφορά, είναι η μείωση του συντελεστή πλήρωσης της κυψέλης.

Αντιστάσεις σε σειρά και παράλληλα μειώνουν το συντελεστή πλήρωσης. Ως εκ τούτου, για μια αποτελεσματική κυψέλη είναι επιθυμητό όσο το δυνατόν μικρότερη R_s και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη R_{sh} (ή R_p). Η αντίσταση σε σειρά προκύπτει από την αντίσταση της ροής ρεύματος από το υλικό της κυψέλης, ιδιαίτερα διαμέσου της μπροστινής επιφάνειας προς τις επαφές (και αυτό είναι ένα σοβαρό πρόβλημα σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος υπό συμπακνωμένο φως). Η παράλληλη αντίσταση είναι ένα πρόβλημα των κακώς επισκευασμένων -συντηρημένων συσκευών (και αυτό προκύπτει από διαρροή ρεύματος μέσω της κυψέλης).

Έτσι, η διορθωμένη εξίσωση της διόδου Shockley, πήρε το όνομά της από τον Φυσικό William Shockley και είναι δίοδος τύπου “p-n-p-n”, τεσσάρων στρωμάτων ισοδύναμη με θυρίστορ που έχει αποσυνδεδεμένη μία πύλη, για πραγματικά ανόργανες συσκευές με αντίσταση σε σειρά και παράλληλα είναι:

$$j_L = j_o \cdot \left(\exp \left(\frac{V - j \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V - j \cdot R_s}{R_p} - j_{ph} \quad (1.10)$$

όπου ένα προαιρετικό (σταθερό) φωτορεύμα J_{ph} περιλαμβάνεται από μια παράλληλη μετατόπιση της καμπύλης ρεύματος-τάσης κάτω από τον άξονα.

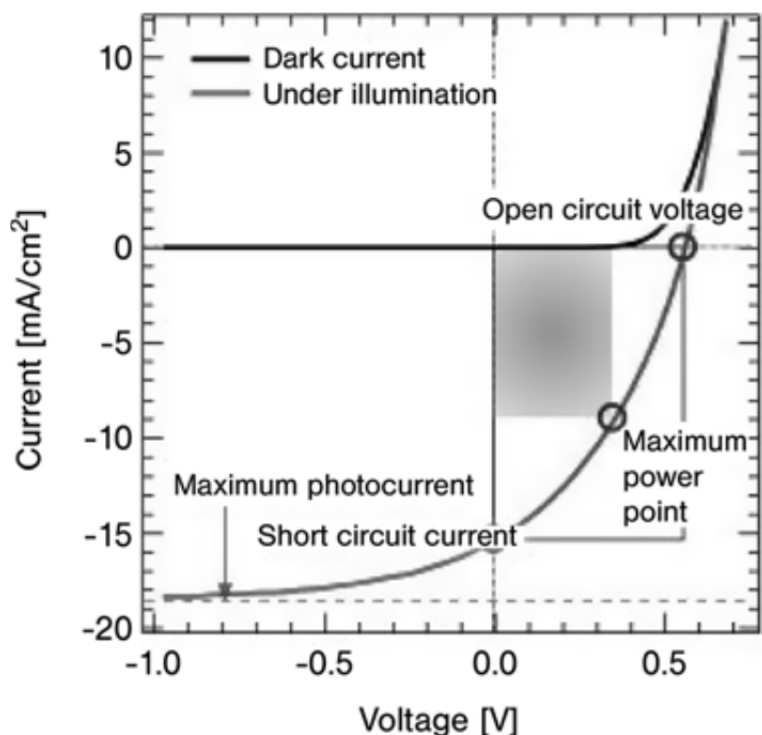
Εν ολίγοις, μια θετική πόλωση οδηγεί στην έγχυση φορέων φορτίου μέσα στην ηλιακή κυψέλη, και το ρεύμα αυξάνει εκθετικά, όπως το ρεύμα διόδου (στην ιδανική περίπτωση). Σε πραγματικές ηλιακές κυψέλες, ωστόσο, υπάρχουν απώλειες, που προκύπτουν από τις δύο αντιστάσεις, της δεύτερης εξίσωσης.

Η εξίσωση αυτή έχει καλή εφαρμογή για ηλιακές κυψέλες πυριτίου, αλλά σε οργανικές ηλιακές κυψέλες (Κεφάλαιο 3) η «παράλληλη αντίσταση» φαίνεται να εξαρτάται από την τάση και την ένταση φωτισμού. Η «αντίσταση σειράς» μεταβάλλεται επίσης από την τάση.

Έτσι, η $j(V)$ καμπύλη για μία τυπική οργανική ηλιακή κυψέλη έχει μεγάλη πεδιοεξάρτηση από το φωτορεύμα. Υπάρχει για παράδειγμα ένα σημείο τομής ανάμεσα στην καμπύλη σκοτεινού ρεύματος και στην καμπύλη ρεύματος υπό φως περίπου στα 700mV, η οποία δεν μπορεί να εξηγηθεί από την εξίσωση Shockley (Σχήμα 1.14).

Ο λόγος είναι ότι τα δεσμευμένα ζεύγη Coulomb ηλεκτρονίου-οπής πρέπει να χωριστούν από ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Στα 700mV (σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο, το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο είναι η διαφορά δυναμικού επαφής μείον το εξωτερικό πεδίο, ισούται με μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε συνθήκες επίπεδης ζώνης και έτσι δεν έχουμε την απαραίτητη ωθούσα δύναμη για να διαχωριστεί το ζευγάρι πόλαρον¹.

¹Ένα πόλαρον είναι ένα ημισωματίδιο που αποτελείται από ένα φορτίο και το συνοδευτικό πεδίο πόλωσής του. Ένα αργά κινούμενο ηλεκτρόνιο σε έναν διηλεκτρικό κρύσταλλο, αλληλεπιδρώντας με τα ιόντα του πλέγματος μέσω δυνάμεων μεγάλης ακτίνας, θα περιβάλλεται διαρκώς από μια περιοχή πολωμένου πλέγματος, έτσι θα προκαλούνται παραμορφώσεις από την κίνηση του ηλεκτρονίου.



Σχήμα 1.14 Η J-V καμπύλη για μία οργανική ηλιακή κυψέλη παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από το φωτορεύμα.

Επομένως θα πρέπει να υπάρχει ένα σημείο τομής.

Όπως μπορεί κανείς να δει από το πάνω μέρος του σχήματος, το μέγιστο φωτορεύμα δεν προκύπτει για 0V, δηλαδή, κάτω από συνθήκες βραχυκυκλώματος, αλλά μόνο σε αρνητική πόλωση, που αντιστοιχεί σε ανώτερο εσωτερικό πεδίο. Αυτό συμβαίνει σε οργανικές ηλιακές κυψέλες, όπου η αποσύνδεση του ζεύγους πόλων είναι πιο δύσκολη. Για παράδειγμα, αν το ενεργό στρώμα είναι παχύτερο, και έχουμε την ίδια (εξωτερική) τάση, το (εσωτερικό) πεδίο στη μηδενική πόλωση είναι μικρότερο.

Πράγματι, δεν υπάρχει αναλυτική εξίσωση ακόμα για να περιγράψει σωστά τις ιδιαιτερότητες των οργανικών ηλιακών κυψελών. Στην πραγματικότητα, ακόμη και σε ανόργανης σύνθεσης ημιαγωγούς, όπως ο CuInSe_2 υπάρχουν παρόμοια σημεία τομής.

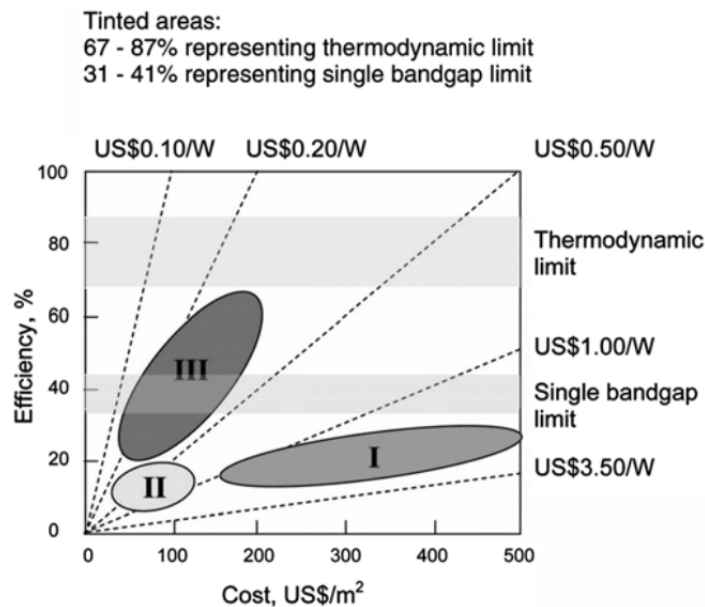
Πολύ περιληπτικά λοιπόν είδαμε το πώς λειτουργεί μία Φ/Β μονάδα. Στην συνέχεια θα επικεντρωθούμε, όπου και είναι ο σκοπός της παρούσας έρευνας, στην παρουσίαση νέων τεχνολογιών, υλικών και διαδικασιών παραγωγής Φ/Β μονάδων που θα μονοπωλήσουν την παγκόσμια αγορά των Φ/Β τις επόμενες δεκαετίες.

1.5 Όρια Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Μετατροπής

Θεωρητικά, το φως του ήλιου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση κοντά στο 95% του ορίου Carnot, μοντελοποιώντας τον ήλιο ως ένα μαύρο σώμα² σε $T_1 = 6000\text{ K}$ (η θερμοκρασία επιφάνειας του ήλιου), και μία κυψέλη που λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου ($T_2 = 300\text{ K}$).

$$\eta = 1 - (T_2/T_1) = 1 - (300/6000) = 0,95 \quad (1.11)$$

Πράγματι, η μέγιστη θεωρητική απόδοση του 93,3% είναι λίγο διαφορετική. Αυτό σημαίνει ενδεχομένως ότι είναι εφικτές μεγάλες βελτιώσεις, στην μετάβαση από το θεωρητικό όριο απόδοσης μετατροπής, 31%, που υπολογίστηκε για μια μονής δομής ηλιακή κυψέλη το 1961, σε εκείνο το όριο κυψελών «φέτας» πυριτίου και λεπτού φιλμ, που υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο.



Σχήμα 1.15 Αποτελεσματική αντιστάθμιση κόστους για τις τεχνολογίες ηλιακών κυψελών τριών γενιών: «φέτας» πυριτίου, λεπτού φιλμ και προηγμένου λεπτού φιλμ.

² Ένα μαύρο σώμα είναι ένα εξιδανικευμένο φυσικό σώμα που απορροφά όλη την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Υπακούοντας στο νόμο του Kirchhoff, της θερμικής ακτινοβολίας, ένα μαύρο σώμα ταιριάζει με αυτή την ιδανική απορροφητικότητα εκπέμποντας τέλεια θερμική ακτινοβολία, το οποίο ακτινοβολεί φως, συνεχούς φάσματος που εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του σώματος. Σε θερμοκρασία δωματίου αυτή η εκπομπή βρίσκεται στο μέγιστό της στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, και έτσι σε τέτοιες θερμοκρασίες το αντικείμενο εμφανίζεται μαύρο, δεδομένου ότι δεν αντανακλά, ούτε εκλύει αξιόλογη ποσότητα ορατού φωτός.

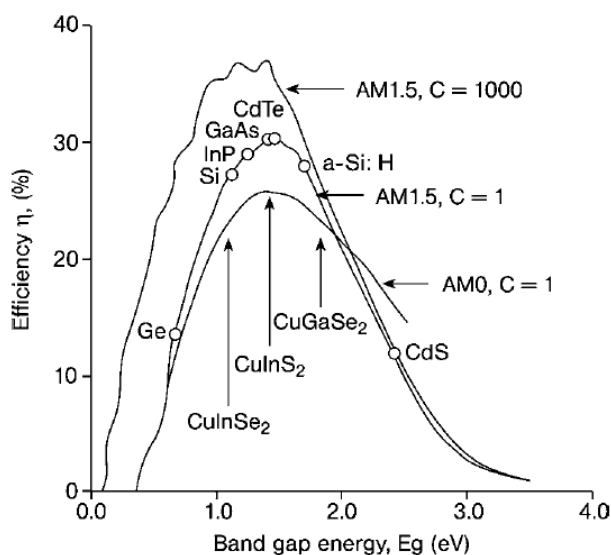
Από τις πρώτες ημέρες των επίγειων φωτοβολταϊκών, υπήρχε μια κοινή αντίληψη ότι οι ηλιακές κυψέλες πρώτης γενιάς «φέτας» πυριτίου τελικά θα αντικατασταθούν από μια δεύτερης γενιάς, χαμηλότερου κόστους τεχνολογίας λεπτού φιλμ, που θα περιλαμβάνει πιθανώς και έναν διαφορετικό ημιαγωγό.

Οι ηλιακές κυψέλες πρώτης γενιάς (Σχήμα 1.15) είχαν υψηλό κόστος παραγωγής με μέτρια απόδοση (15-20%), η δεύτερη γενιά κυψελών προσφέρουν πολύ χαμηλότερο συνολικό κόστος παραγωγής, αλλά παράλληλα ακόμη χαμηλότερες αποδόσεις (5-10%). Οι κυψέλες τρίτης γενιάς έχουν υψηλή απόδοση και ελαφρώς υψηλότερο κόστος παραγωγής, το οποίο σε μεγάλο βαθμό αντισταθμίζεται από την αύξηση της αποτελεσματικότητας που προκύπτει από το χαμηλό κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας (Πίνακας 1.2).

Ιστορικά, το θειούχο κάδμιο, το άμορφο πυρίτιο, ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός, το τελλουριούχο κάδμιο και τώρα το πυρίτιο πολυκρυσταλλικού λεπτού φιλμ θεωρούνται ως υποψήφια υλικά «κλειδιά» για την τεχνολογία ΦΒ λεπτού φιλμ. Πράγματι, αυτά τα ανόργανα υλικά αφήνουν εξαιρετικές υποσχέσεις, από άποψη αποτελεσματικότητας (Σχήμα 2.16) και μπορούν να ενσωματωθούν σαν μονάδες χαμηλού βάρους σε υπάρχουσες δομές.

Πίνακας 1.2 Τα τρία κύματα εξέλιξης των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών.

Generation	Efficiency	Cost €/watt
I	0.15	1.00
II	0.15	0.50
III	0.8	0.20



Σχήμα 1.16 Προβλεπόμενη απόδοση έναντι ενεργειακού κενού για φωτοβολταϊκά υλικά λεπτού φιλμ για ηλιακά φάσματα στο διάστημα (AM0) και στη γη (AM1.5) σε 300° K σε σύγκριση με άλλα φωτοβολταϊκά υλικά υπό πυκνό και μη πυκνό (1) ηλιακό φως.

Οποιαδήποτε ώριμη τεχνολογία ηλιακών κυψελών φαίνεται πιθανό να εξελιχθεί στο στάδιο όπου το κόστος θα παίζει δευτερεύοντα ρόλο από αυτόν, των συστατικών υλικών, είτε πρόκειται για «φέτες» πυριτίου είτε για φύλλα γυαλιού.

Τα φωτοβολταϊκά είναι πιθανό να εξελιχθούν, στην πιο ώριμη μορφή τους, σε μια τρίτης γενιάς υψηλής απόδοσης τεχνολογία λεπτού φιλμ. Λέγοντας υψηλή απόδοση εννοούμε μετατροπή της ενέργειας διπλάσια ή και τριπλάσια του 15-20%, που στοχεύουμε σήμερα, πιο κοντά στο θερμοδυναμικό όριο του 93%.

Οι ιδέες, για τα ΦΒ τρίτης γενιάς, βασίζονται σε συσκευές που μπορούν να υπερβούν το θεωρητικό όριο απόδοσης ηλιακής μετατροπής. Ο υπολογισμός του ορίου αυτού έγινε από τους *Shockley και Queisser*³. Το όριο αυτό υπολογίστηκε στο 31% απόδοση μετατροπής κάτω από φωτισμό 1 “ήλιου” (1 sun) και 40.8% κάτω από μέγιστη συγκέντρωση ηλιακού φωτός (46200 suns), για ένα βελτιστοποιημένο ενεργειακό κενό της τάξης του 1,3 eV και 1,1 eV αντίστοιχα.

Για Si και GaAs, το ενεργειακό κενό ανέρχεται σε 1,12 eV και 1,45 eV αντίστοιχα, ο περιορισμός της αποτελεσματικότητας και των δύο είναι περίπου στο 29% για συνθήκες μη συμπυκνωμένου φωτός. Έτσι, το ρεκόρ αποτελεσματικότητας στην κάθε περίπτωση, είναι 24,7% και 25,1% αντίστοιχα, για φωτισμό 1 ήλιου (1sun) όπου οι συσκευές πλησιάζουν το όριο ακτινοβολίας.

Οι διαδρομές για την υπέρβαση του ορίου Shockley-Queisser οδηγούν στο ενεργειακό κενό και στους μηχανισμούς απώλειας θερμικής ισορροπίας. Τρεις τύποι προσέγγισης έχουν προταθεί για εφαρμογή πολλαπλών ενεργειακών επιπέδων:

- αύξηση του αριθμού των επιπέδων ενέργειας
- πολλαπλή παραγωγή ζεύγους φορέα ανά φωτόνιο υψηλής ενέργειας
- δέσμευση των φορέων πριν επέλθει θερμική ισορροπία.

Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε όλο το ηλιακό φάσμα. Ένας τρόπος που μπορούμε να το επιτύχουμε είναι η χρήση διπλών (σε σειρά) κυψελών οι οποίες διασπών το ηλιακό φάσμα σε στενές ζώνες συχνότητας που έχουν μετατραπεί από την μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της πλέον κατάλληλης κυψέλης. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή που λαμβάνει χώρα στις ανορθωτικές ναοκεραίες, οι οποίες μεταδίδουν την ηλιακή ακτινοβολία σε διόδους σήραγγας. Τα κβαντικά φαινόμενα σ' αυτό παράγουν μεταβλητά ρεύματα, των οποίων η ενέργεια είναι ισοδύναμη με εκείνη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, εκτιμώντας ότι η ένταση που παράγεται στο κύκλωμα αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα του προσπίπτοντος φωτονίου. Δεδομένου ότι το 44% της ηλιακής ακτινοβολίας έχει μήκη κύματος μεταξύ 0,4 και 0,7 μm, η ανορθωτική ναοκεραία θα πρέπει να λειτουργεί με ταχύτητα έως και 600 THz για να την απορροφήσει εξ ολοκλήρου.

³ Το όριο Shockley-Queisser ή λεπτομερές όριο ισορροπίας αναφέρεται στη μέγιστη θεωρητική αποδοτικότητα των ηλιακών κυψελών χρησιμοποιώντας μια επαφή τύπου p-n για τη συλλογή ενέργειας από την κυψέλη. Το όριο αυτό υπολογίστηκε πρώτα από τον William Shockley και Hans Queisser το 1961.

2. Ανόργανα Λεπτά Φιλμ

2.1 Λεπτά Φ/Β Φιλμ : Η Τεχνολογία Για Το Μέλλον

Οι πελάτες που αγοράζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία ενδιαφέρονται για υψηλές αποδόσεις ενέργειας ανά αγορασθέν watt υψηλής ισχύος σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο ενός Φ/Β συστήματος, σε πραγματικές εξωτερικές συνθήκες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε χώρες όπου διαθέτουν υψηλά τιμολόγια τροφοδότησης ανά κιλοβατώρα (kWh), όπως η Γερμανία ή η Ισπανία.

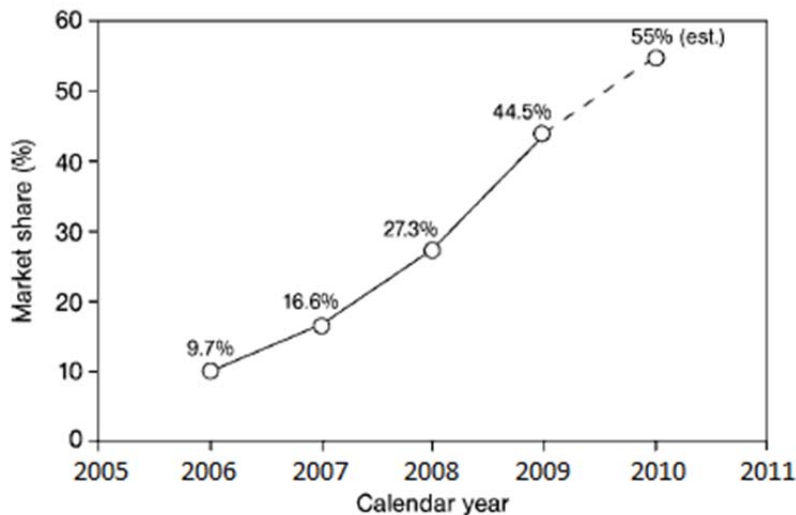
Οι ηλιακές μονάδες πωλούνται συνήθως με μέγιστη απόδοση ισχύος (Wp) η οποία δοκιμάζεται κάτω από πρότυπες εργαστηριακές συνθήκες (Standard Testing Conditions): δηλαδή, κάτω από πολύ υψηλή και άμεση ακτινοβολία (1000Wm^{-2}), και σε θερμοκρασία (ηλιακών μονάδων) 25°C , και μόνο με ένα τύπο του ηλιακού φάσματος, (AM1.5: κυρίως άμεση ακτινοβολία).

Υπό πραγματικές εξωτερικές συνθήκες, αυτή η μέγιστη ισχύς σπάνια επιτυγχάνεται, αφού η θερμοκρασία της ηλιακής μονάδας συνήθως θα ανέλθει σε $40-60^{\circ}\text{C}$, υπό φωτισμό, (ισχύει ιδιαίτερα για τις μονάδες που είναι ενσωματωμένες σε κτίριο), τις ώρες της ακτινοβολίας 1000Wm^{-2} είναι περίπου μόνο το 1% των συνολικών ηλιακών ωρών με το φασματικό και κατοπτρικό περιεχόμενο του ηλιακού φάσματος να αλλάζουν συνεχώς ανάλογα τις μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες. Το διάχυτο φως, για παράδειγμα, κυριαρχεί όταν ο ουρανός είναι συννεφιασμένος ή κατά τη διάρκεια των πρωινών και των απογευματινών ωρών. Στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προέρχεται από το διάχυτο φως (πάνω από το 50% του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας) και ακόμα και στη Μαδρίτη το διάχυτο φως ανέρχεται στο 33% του ολικού φωτός.

Προκειμένου συνεπώς να προβλέψουμε ποια θα είναι η παραγωγή ενέργειας από μία Φ/Β μονάδα ή ένα Φ/Β σύστημα με μια συγκεκριμένη ονομαστική ισχύ, είναι αναγκαίο να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της ηλιακής μονάδας κάτω από ποικίλες καιρικές συνθήκες.

Τα λεπτού φίλμ (Λ/Φ) Φ/Β ξεπερνούν σταθερά τα συμβατικά που βασίζονται στα πάνελ πυριτίου σε αυτό το κρίσιμο θέμα. Επιπλέον, δεδομένου ότι το κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ενέργειας σε μεγάλο βαθμό καθορίζει την ανταγωνιστικότητα ενός Φ/Β πάνελ, τα Φ/Β λεπτού Φιλμ είναι το μέλλον των φωτοβολταϊκών, καθώς διαθέτουν μεγαλύτερη δυνατότητα για χαμηλό κόστος παραγωγής.

Σε όλο τον κόσμο, τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πυριτίου εξακολουθούν να κυριαρχούν σε περισσότερο από το 94% του μεριδίου αγοράς, και το μερίδιο των Λ/Φ Φ/Β ήταν λιγότερο από 6% το 2005. Ωστόσο, αυτό αυξήθηκε σε 20% το 2008 και αναμένεται να ξεπεράσει το 30% σε μακροπρόθεσμη βάση.



Σχήμα 2.1 Εξέλιξη, στο μερίδιο αγοράς, των Λ/Φ Φ/Β στις ΗΠΑ.

Για παράδειγμα, το μερίδιο αγοράς των Λ/Φ Φ/Β στις Η.Π.Α. έχει αυξηθεί ραγδαία κατά τα τελευταία αρκετά χρόνια και το 2007, το μερίδιο αγοράς Λ/Φ Φ/Β αναμενόταν να ξεπεράσει αυτό της τεχνολογίας πυριτίου στις ΗΠΑ (Σχήμα 2.1).

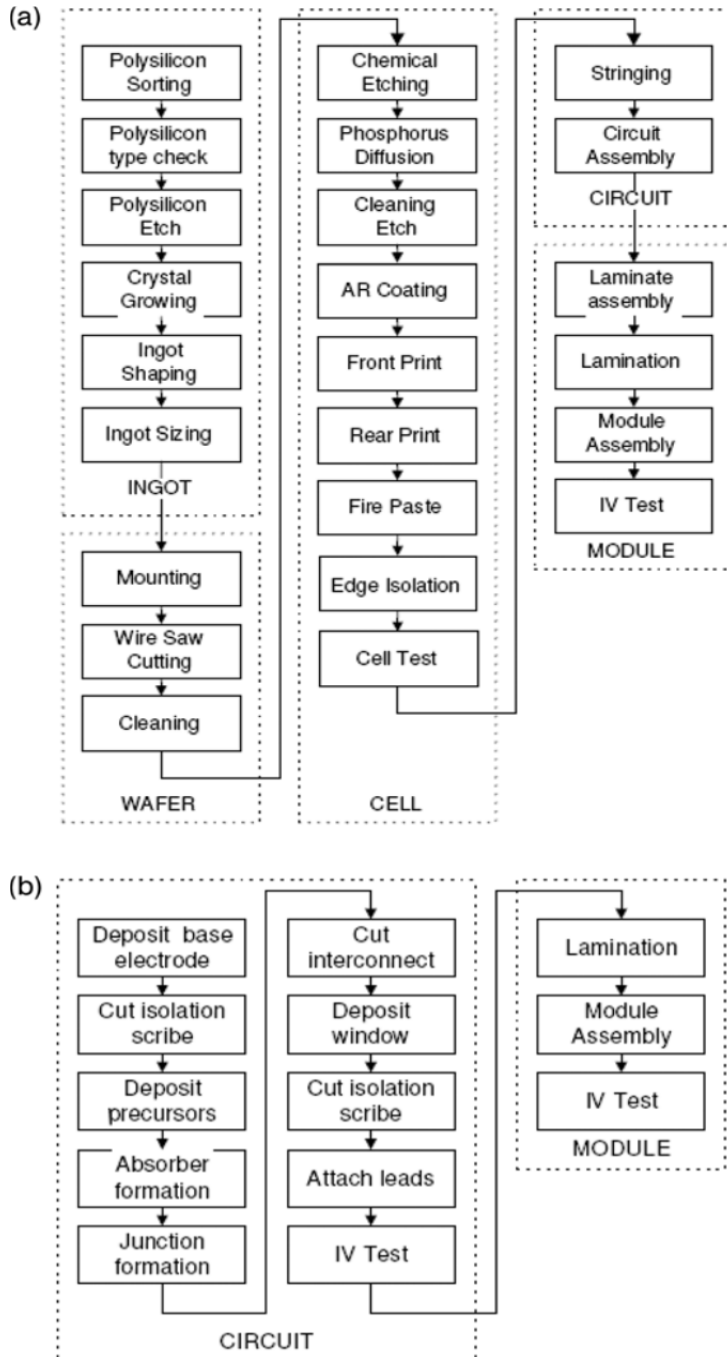
Συγκρινόμενη με τις παραδοσιακές τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου, οι τεχνολογίες λεπτού φιλμ αποδίδουν προϊόντα συγκρίσιμης απόδοσης, αλλά με σημαντικά πλεονεκτήματα στον τομέα της μεταποίησης:

- Χαμηλότερη κατανάλωση των άμεσων και έμμεσων υλικών.
- Ανεξαρτησία από την έλλειψη προμηθειών πυριτίου.
- Λιγότερα και αυτοματοποιημένα στάδια επεξεργασίας
- Ολοκληρωμένος, μονολιθικός σχεδιασμός κυκλώματος – χωρίς συναρμολόγηση μεμονωμένων ηλιακών κυψελών στο τελικό προϊόν.

Τα πλεονεκτήματα αυτά μεταφράζονται σε ουσιαστική μείωση του κόστους κατασκευής του προϊόντος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, η πλήρης, παραδοσιακή διαδικασία περιλαμβάνει περισσότερα από εικοσιτέσσερα ξεχωριστά βήματα για την προετοιμασία και την επεξεργασία ράβδων πυριτίου, «φετών» πυριτίου, κυψελών, και συναρμολόγησης κυκλωμάτων πριν να ολοκληρωθεί η μονάδα. Η παραγωγή μονάδων Λ/Φ, αντιθέτως, απαιτεί μόνο τα μισά βήματα της διαδικασίας από την επεξεργασία κρυσταλλικού πυριτίου με απλουστευμένη επεξεργασία υλικών.

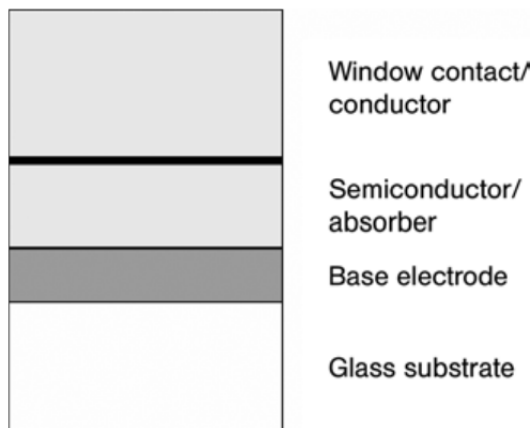
Τα Λ/Φ Φ/Β κυκλώματα απαιτούν εναπόθεση τριών στρωμάτων: ένα βασικό στρώμα ηλεκτροδίου, ένα στρώμα ημιαγωγών, και ένα διαφανές στρώμα καλύμματος αγωγού. Υπάρχουν τρία βήματα σχηματοποίησης, ένα μετά από κάθε στρώμα, που δημιουργούν την ολοκληρωμένη σύνδεση σειράς από κυψέλη σε κυψέλη στο κύκλωμα. Τέλος, ένα γυαλί όψεως τοποθετείται με την μορφή ελάσματος στο γυαλί του κυκλώματος για την τελική συναρμολόγηση της μονάδας (Σχήμα 2.3).

Μια βασική κινητήρια δύναμη για την πρόοδο των τεχνολογιών του λεπτού φιλμ υπήρξε η έλλειψη του πολυπυριτίου που ξεκίνησε το 2004. Το 2006, για πρώτη φορά, περισσότερο από το ήμισυ της παραγωγής πολυπυριτίου πήγε σε Φ/Β αντί για ολοκληρωμένα κυκλώματα υπολογιστών (chip).



Σχήμα 2.2 Σειρά διαδικασίας παραγωγής μονάδων κρυσταλλικού πυριτίου (a) και σειρά διαδικασίας παραγωγής μονάδων Λ/Φ Φ/Β (b).

Η παροχή πολυπυριτίου αναμενόταν να ανταποκριθεί στη ζήτηση μέχρι το 2010, αλλά όχι πριν τα Λ/Φ Φ/Β απορροφήσουν το 20% της αγοράς. Με την αύξηση των προμηθειών πολυπυριτίου, με τη σειρά τους, οι προβλεπόμενες μέσες τιμές Φ/Β έπεσαν στα \$ 2 ανά watt το 2010.



Σχήμα 2.3 Κοινά στοιχεία των περισσότερων Λ/Φ Φ/Β

Σε όλο τον κόσμο υπάρχει πρόβλεψη για το 2011 ότι η ικανότητα παραγωγής των Λ/Φ Φ/Β θα είναι μεγαλύτερη από 3700MW, με 1127MW στις ΗΠΑ, 1312MW στην Ιαπωνία, 793MW στην Ευρώπη και 472MW στην Ασία (Πίνακας 2.1).

Σε γενικές γραμμές, τα Λ/Φ Φ/Β αναμένεται να αντιπροσωπεύουν το 35% της αγοράς φωτοβολταϊκών μέχρι το 2015, σε 7,2 δις. δολάρια σε σύγκριση με το σήμερα που είναι μόλις πάνω από \$ 1,0 δις. Από αυτά, η αξία των έντυπων Λ/Φ Φ/Β αναμένεται να φτάσει πάνω από \$ 3.0 δις, αφού η τύπωση Λ/Φ Φ/Β έχει τη δυνατότητα να μειώσει το κόστος κεφαλαίου έως και 75%, μειώνοντας τα απόβλητα και αυξάνοντας την απόδοση.

Η αγορά ωθείται από τα εγγενή πλεονεκτήματα που διαθέτουν τα Λ/Φ Φ/Β συμπεριλαμβανομένων του χαμηλού κόστους, του χαμηλού βάρους, της ικανότητας παραγωγής τους σε εύκαμπτο υπόστρωμα και τις δυνατότητες ενσωμάτωσης της ηλιακής ενέργειας σε τοίχους, σε οροφές και παράθυρα. Το γεγονός πως τα Λ/Φ Φ/Β είναι αρκετά ελαφρύτερα από τα συμβατικά Φ/Β σημαίνει ότι μπορούν να προστεθούν σε μια στέγη χωρίς την ανάγκη να την ενισχύσουμε.

Η αμερικανική εταιρεία, Solar Integrated, κατασκευάζει ελασματοποιημένο Λ/Φ Φ/Β άμορφου πυριτίου⁴ (Si), με πλαστική επένδυση, και το ενσωματώνει σε υφάσματα υψηλής αντοχής. Το τελικό προϊόν είναι ένα συμπαγές υφάσμα και εύκαμπτο ηλιακό πάνελ, που ζυγίζει μόλις 3,66 kgm⁻² που μπορεί κυριολεκτικά να εφαρμοστεί, για γρήγορη εγκατάσταση, σε σχεδόν οποιαδήποτε επίπεδη επιφάνεια.

Παρομοίως, η ελβετική εταιρεία Flexcell κατασκευάζει κομμάτια εύκαμπτα Φ/Β πυριτίου (Si), που ενσωματώνονται στα κτίρια. Η εγκατάσταση ξεκινάει με την υπάρχουσα επιφάνεια οροφής. Προσθέτει άκαμπτη μόνωση και γυψοσανίδα, που παρέχουν αντίσταση ενάντια σε διατρήσεις και τη φωτιά, και ολοκληρώνει την οροφή με ένα ανθεκτικό λευκό φινιρίσμα (Σχήμα 2.4). Αυτά τα τρία στοιχεία παρέχουν στους πελάτες μια οροφή με απόδοση ενέργειας, ανθεκτική στις καιρικές συνθήκες

⁴ Άμορφο πυρίτιο ονομάζουμε την μη-κρυσταλλική αλλοτροπική μορφή του πυριτίου.

που βελτιώνει σημαντικά την θερμική απόδοσή της και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας μειώνοντας την επιφανειακή θερμοκρασία. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, αντί της απορρόφησής της. Αυτό λοιπόν είναι ένα χαρακτηριστικό που βελτιώνει ουσιαστικά την παραγωγικότητα των φωτοβολταϊκών κυψελών από τη στιγμή που γίνεται η εγκατάστασή τους.

Η εταιρεία, η οποία διαπραγματεύεται στο Χρηματιστήριο του Λονδίνου, τριπλασίασε στην πραγματικότητα την παραγωγή της από 8.5MW το 2007 σε 24MW το 2008, με έσοδα που ανέρχονται στα 38 εκατομμύρια δολάρια το 2006 και στα 145 εκατομμύρια στο τέλος του 2008.

(a)



(b)



Σχήμα 2.4 Εύκαμπτα Φ/Β πυριτίου (a) στην Ευρώπη (b) και στις Η.Π.Α. Μικρό βάρος, ευκολία εγκατάστασης και χαμηλό κόστος προκαλούν ταχεία επιτυχία των Λ/Φ Φ/Β στην αγορά.

Group	Material	Present (MW)	Additional (MW)	Total (MW)	Group	Material	Present (MW)	Additional (MW)	Total (MW)	Totals	Grand Total
USA	First Solar	90	-	90	Nanosolar	CS	-	430	430	1127	3704
	Uni-Solar	60	240	300	Aiva Solar	CdTe	3	20	23		
	MiaSole	5	50	55	Nano PV	a-Si	-	4	4		
	Global Solar	3	60	63	OptiSolar	a-Si	-	40	40		
	EPV	2	25	27	Primerstar Solar	CdTe	-	20	20		
	Dejstar Technologies	1	10	11	SoloPower	CS	-	20	20		
	Power Firm	1	10	11	ISET	CS	-	3	3		
	Assent Solar	2	25	27	IMIDE Solar	a-Si	-	3	3		
					HelioVolt	CS	-	20	20		
JAPAN	Kareika	20	50	70	MH-1	a-Si	14	56	70	1312	
	Shima Steel	20	60	80	Kanto-Sanyo	a-Si	7	-	7		
	Sharp	15	1000	115	Honda	CS	3	27	30		
EUROPE	First Solar	120	100	220	AMI	a-Si	-	160	160	793	
	CSG Solar	10	15	25	Johanna Solar Tech	CS	-	30	30		
	Wurth Solar	3	15	18	Britair	a-Si	-	25	25		
	Artec Solar	10	-	10	Solisro	CS	-	30	30		
	Schott Solar	3	27	30	Globe Solar	CS	-	30	30		
	ICP Solar Tech	3	-	3	Helio Bird	a-Si	-	50	50		
	Solar Cells	1	-	1	SunFim	a-Si	-	60	60		
	Free Energy	1	-	1	T.J. Solar	a-Si	-	40	40		
	Solar Plus	-	5	5	Signal Solar	a-Si	-	20	20		
	Solar Cells	5	-	5	Cyroc	CdTe	-	25	25		
	Aiko Solar	-	30	30	Akron	CS	-	20	20		
	Ensol	-	40	40	Coasun	CS	-	5	5		
					Scheuler Solar	CS	-	10	10		
ASIA	First Solar	-	220	220	GET	a-Si	-	40	40	472	
	Bangkok Solar	7	-	7	Nanovin Tech	a-Si	-	35	35		
	Sincera	3	-	3	Moses Beer	a-Si	-	20	20		
	T.J. Solar Cell	2	-	2	Solar Morph	a-Si	-	20	20		
	Solech	15	-	15	Torray Solar	a-Si	20	-	20		
	Suntech Power	-	50	50	CMC	a-Si	-	40	40		

Πίνακας 2.1 Δυναμικότητα Λ/Φ Φ/Β (2007 – 2010)

Το γράφημα μετοχών για μία εταιρεία (First Solar) δείχνει το τεράστιο ενδιαφέρον της αγοράς για τα Λ/Φ Φ/Β (Σχήμα 2.5). Ως αποτέλεσμα αυτής της γενικής τάσης, οι περισσότεροι κατασκευαστές, συμπεριλαμβανομένης της First Solar, Fuji Electric, Nanosolar, Sanyo, Uni-Solar και G24i, αναδιατάσσουν την παραγωγική ικανότητά τους χτίζοντας εργοστάσια παραγωγής μεγαλύτερης των 100 MW.

Οι επενδυτές και οι συντελεστές του κλάδου συμφωνούν στην αναγνώριση ότι τα Φ/Β εισέρχονται σε μια φάση «εμπορευματοποίησης». Αλλά σε αντίθεση με οποιαδήποτε άλλη ώριμη βιομηχανία, δεν θα παγιωθεί ως μία μοναδική επιτυχής τεχνολογία βασιζόμενη στο χαμηλότερο κόστος, καθώς διαφορετικοί πελάτες θα απαιτούν διαφορετικά προϊόντα.

Τελικά, τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα στην αγορά θα καθορίζονται από ένα συνδυασμό της δομής του κόστους και των χαρακτηριστικών των προϊόντων που θα οδηγούν κατά περίπτωση στην επιλογή του πελάτη. Με άλλα λόγια, η νέα βιομηχανία Φ/Β θα εμφανίζει πολλαπλές εμπορικές κατηγορίες προϊόντων με τους προμηθευτές να εκμεταλλεύονται διαφοροποιημένα σχέδια προϊόντων για διαφορετικές εφαρμογές (σχήμα 2.6).

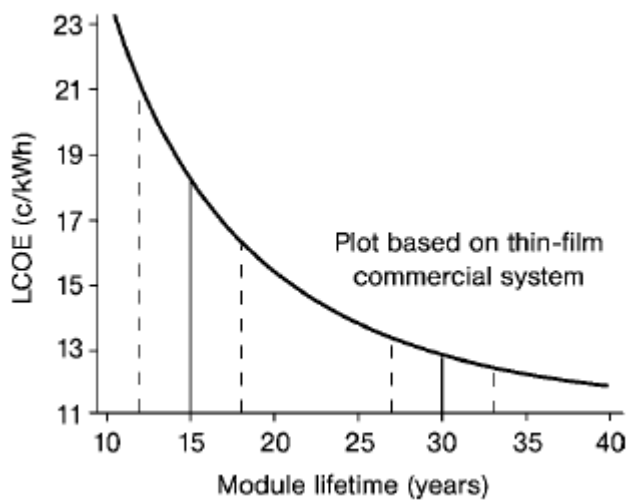
Όποια και αν είναι η μέθοδος επιλογής, ωστόσο, για να διατηρήσουν τα οικονομικά πλεονεκτήματά τους τα Λ/Φ Φ/Β, πρέπει να γίνει πρόοδος, στην κατασκευή του επίπεδου ατμοστεγούς φράγματος της τάξης των (10^{-6} gm^{-2})/day (ανά ημέρα) ή και καλύτερα. Το ατμοστεγές φράγμα **MB** (**Moisture Barrier**) καθορίζεται από τον ρυθμό μετάδοσης ατμών υγρασίας **MVTR** (**Moisture Vapor Transmission Rate**). Ο παράγοντας MVTR είναι ποιοτικό χαρακτηριστικό των Λ/Φ Φ/Β, καθώς καθορίζει την διάρκεια ζωής τους (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.5 Γράφημα επίδοσης μετοχών το 2007 και αρχές του 2008 για έναν κατασκευαστή Λ/Φ Φ/Β CdTe (Τελλουριούχο Κάδμιο), δείχνει ότι τα Λ/Φ Φ/Β αποτελούν μία «εκρηκτική» τεχνολογία.



Σχήμα 2.6 Ακριβώς όπως τα διαφορετικά υλικά ποδηλάτων εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες, έτσι και η εμπορευματοποίηση των φωτοβολταϊκών θα οδηγήσει σε μια παρόμοια ποικιλία στην τεχνολογία που προσφέρουν.



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα ισοζυγίου κόστους ενέργειας LCOE (Levelized Cost Of Energy) - διάρκεια ζωής μονάδων Λ/Φ. Σχεδόν όλα τα οφέλη ευελιξίας εκμηδενίζονται εάν δεν επιτευχθεί μια διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 20 ετών. (Πηγή: Υπουργείο Ενέργειας, ΗΠΑ).

2.2 Λεπτά Φιλμ Άμορφου Πυριτίου

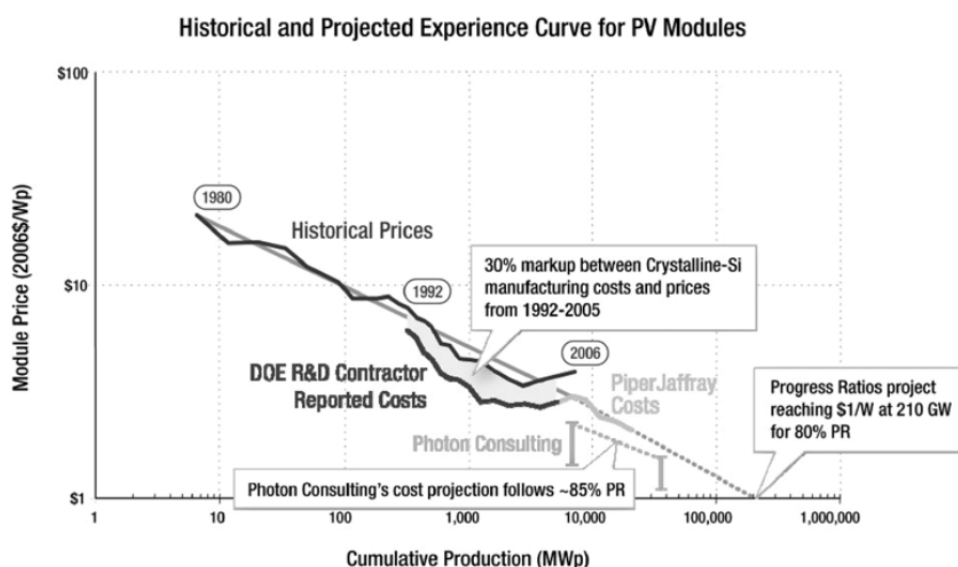
Οι κρυσταλλικές «φέτες» πυριτίου έχουν κυριαρχήσει στην βιομηχανία των Φ/Β από την εποχή που ξεκινά η άνθησή τους. Το πυρίτιο είναι ευρέως διαθέσιμο, έχει ένα πειστικό ιστορικό αξιοπιστίας και τα φυσικά του χαρακτηριστικά είναι απολύτως κατανοητά. Η τιμή της τεχνολογίας έχει μειωθεί κατά 20% για κάθε

διπλασιασμό της εγκατεστημένης ισχύος με βάση τον γνώμονα ανάπτυξης, την αύξηση της ζήτησης, τις επενδύσεις κεφαλαίων και την αύξηση της παραγωγής (διάγραμμα 2.8).

Οι κρυσταλλικές «φέτες» πυριτίου γίνονται όλο και πιο λεπτές και μεγαλύτερης επιφάνειας. Για παράδειγμα, έχει μειωθεί το πάχος τους από 400μm το 1990 σε 200μm το 2006 και έχει αυξηθεί το εμβαδόν επιφάνειας από 100 έως 240cm². Έτσι, έχει αυξηθεί η απόδοση των μονάδων από περίπου 10% το 1990 σε ποσοστό μεγαλύτερο από 15,5%, σήμερα.

Η τεχνολογία Λ/Φ κράματος άμορφου πυριτίου (a-Si) προσφέρει μια ενδιαφέρουσα ευκαιρία να μειωθεί το κόστος υλικών των ηλιακών κυψελών. Επειδή το κράμα a-Si απορροφά το φως πιο αποτελεσματικά από τον κρυσταλλικό ομόλογό του, το πάχος των ηλιακών κυψελών a-Si μπορεί να είναι έως 300 φορές μικρότερο από εκείνο των συμβατικών κυψελών, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση κόστους των υλικών. Ένα σημαντικό βήμα στην εξέλιξη αυτή ήταν η εισαγωγή το 1997 των μονάδων τριπλής δομής που παρέχουν σχετικά υψηλά επίπεδα απόδοσης και σταθερότητας.

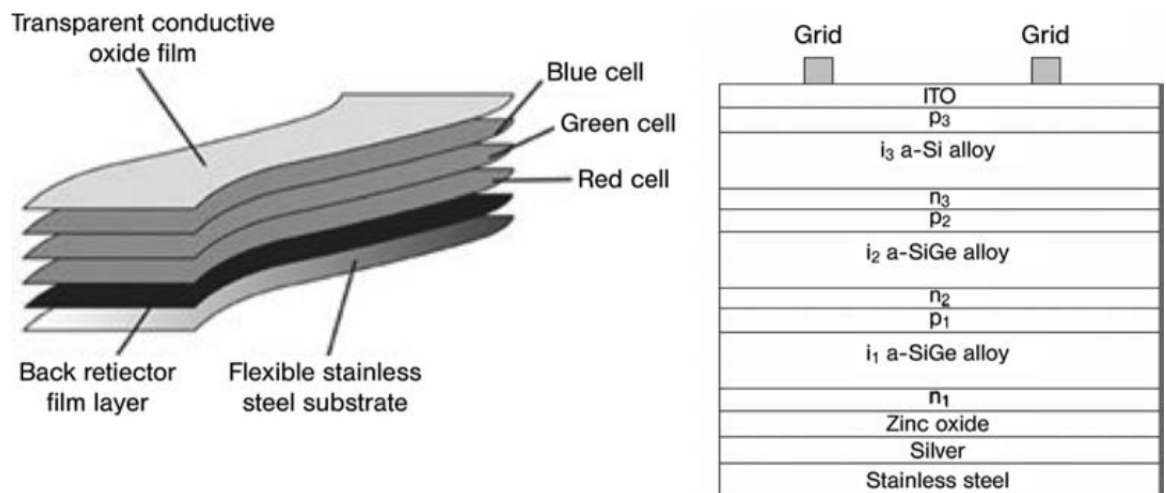
Σε μια κυψέλη τριπλής δομής (σχήμα 2.9), οι κυψέλες με διαφορετικά ενεργειακά κενά (E_g) στοιβάζονται (αλληλοδιαδοχική δομή) μαζί. Η πάνω κυψέλη, η οποία συλλαμβάνει τα μπλε φωτόνια χρησιμοποιεί κράμα a-Si με ένα οπτικό χάσμα 1.8eV για το εσωτερικό (i) στρώμα. Το στρώμα (i) για τη μεσαία κυψέλη είναι ένα κράμα άμορφου πυριτίου του γερμανίου (a-SiGe) με περίπου 10-15% Ge και οπτικό χάσμα περίπου της τάξης του 1,6eV, το οποίο είναι ιδανικό για την απορρόφηση των πράσινων φωτονίων. Η κάτω κυψέλη συλλαμβάνει τα κόκκινα και τα υπέρυθρα φωτόνια χρησιμοποιώντας ένα στρώμα (i) κράματος a-SiGe με περίπου 40-50% Ge, που αντιστοιχεί σε ένα οπτικό χάσμα της τάξης του 1,4eV.



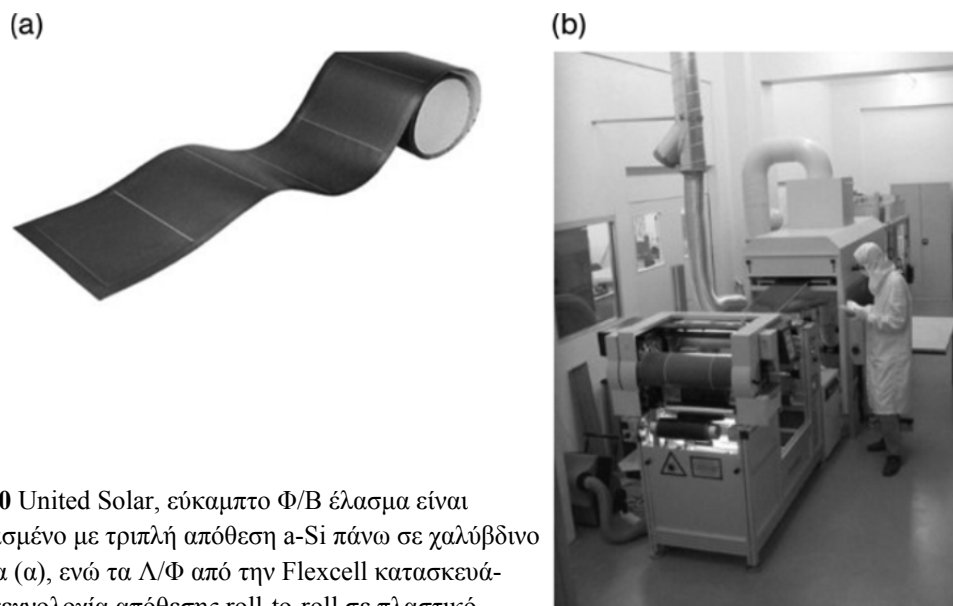
Σχήμα 2.8 Η βιομηχανία φωτοβολταϊκών πλησιάζει σε ισοτιμία δικτύου σε όλον τον ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης), λόγω της πολιτικής με γνώμονα την αύξηση της ζήτησης, τις επενδύσεις κεφαλαίων και την αύξηση της παραγωγής.

Το φως που δεν απορροφάται από τις κυψέλες αντανακλάται από τον ανακλαστήρα αλουμινίου / οξειδίου του ψευδαργύρου (Al/ZnO). Η συνήθης υφή του διευκολύνει την παγίδευση του φωτός.

Η απόθεση στην κυψέλη γίνεται με χρήση μιας διεργασία απόθεσης ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο χρόνος απόσβεσης ενέργειας είναι κατά συνέπεια πολύ μικρότερος από ότι με την συμβατική τεχνολογία. Η διαδικασία ρολού-σε-ρολό (**roll-to-roll** ή **R2R**) χρησιμοποιεί ένα εύκαμπτο, υπόστρωμα ανοξείδωτου χάλυβα (σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.9 Άμορφο πυρίτιο δομής με τριπλή δομή. (Αναδημοσίευση από το Uni-solar.com).



Σχήμα 2.10 United Solar, εύκαμπτο Φ/Β έλασμα είναι κατασκευασμένο με τριπλή απόθεση a-Si πάνω σε χαλύβδινο υπόστρωμα (α), ενώ τα Λ/Φ από την Flexcell κατασκευάζονται με τεχνολογία απόθεσης roll-to-roll σε πλαστικό υπόστρωμα (β). (Αναδημοσίευση από www.uni-solar.com και www.flexcell.ch)

Μόλις το υλικό της ηλιακής κυψέλης εφοδιασθεί με τα κατάλληλα ηλεκτρόδια, οι κυψέλες «σφραγίζονται» μέσα σε πολυμερές, ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες και με σταθεροποιημένο UV. Αυτή η διαδικασία ελασματοποίησης ενσωματώνει ένα φθοροπολυμερές στο πάνω μέρος. Το κάτω μέρος του τελικού προϊόντος είναι ένα πολυεστερικό υλικό κατάλληλο για κόλλες. Η εγγενής ευκαμψία του προκύπτοντος ελάσματος καθώς και το ανθεκτικό «σφράγισμα», οδηγεί σε μια ελαφριά, Φ/Β μονάδα που έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που κυμαίνεται από φόρτιση μιας μπαταρίας έως μεγάλης κλίμακας διασυνδεδεμένα συστήματα.

Σε εργοστάσιο μεγάλης παραγωγής στο Μίσιγκαν (ΗΠΑ), οι ηλιακές κυψέλες είναι σε ρολά από ανοξείδωτο χάλυβα, μήκους 1,5 μιλίων, χρησιμοποιώντας μηχανές αυτοματοποιημένης παραγωγής. Ρολά από ανοξείδωτο χάλυβα, μήκους 2500m, πλάτους 36cm και πάχους 125 μm, κινούνται με έναν συνεχή τρόπο μέσα από τέσσερις μηχανές για να ολοκληρωθεί η κατασκευή της ηλιακής κυψέλης. Οι τέσσερις μηχανές είναι το πλυντήριο που πλένει τα ρολά ανά ένα, μια μηχανή που εναποθέτει τον πίσω ανακλαστήρα με ψεκασμό Al και ZnO πάνω στα πλυμένα ρολά, ένας επεξεργαστής άμορφου κράματος πυριτίου που εναποθέτει στρώματα κράματος, a-Si και a-SiGe, και, τέλος, μία μηχανή επίστρωσης που εναποθέτει μια αντι-ανακλαστική επίστρωση οξειδίου του ινδίου κασσίτερου (**Indium Tin Oxide, ITO**) επάνω στα ρολά. Ακολούθως γίνεται επεξεργασία των επικαλυμμένων ρολών ώστε να καταστούν ελαφριά, εύκαμπτα και στιβαρά.

Η Flexcell, στην Ελβετία, χρησιμοποιεί μια διαδικασία τεσσάρων σταδίων κατασκευής R2R κατά την οποία η μεταλλική επίστρωση ενός πλαστικού ρολού (πάχους 50μm) ακολουθείται από χημική εναπόθεση στρωμάτων a-Si και διαφανούς αγώγιμου οξειδίου (**Transparent Conductive Oxide, TCO**) μέσω διαμόρφωσης των στρωμάτων και «σφραγίσματος» της μονάδας με πλαστικά φύλλα (σχήμα 2.10).

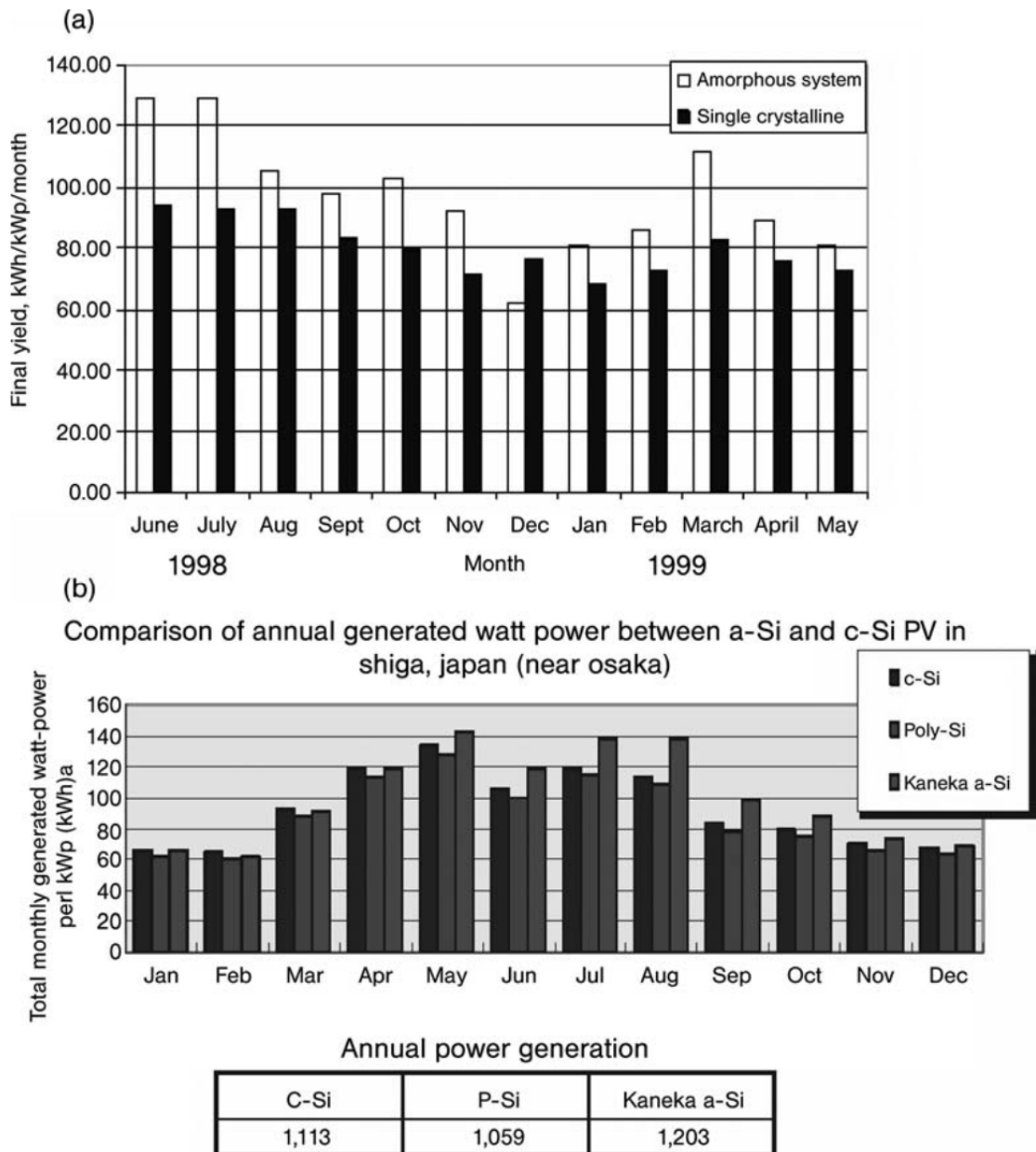
Υπό πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος, η τεχνολογία τριπλής δομής, άμορφου πυριτίου, δείχνει σταθερή απόδοση στην πάροδο του χρόνου. Τα αποτελέσματα των παρατεταμένων, ανεξάρτητων δοκιμών, πιστοποιούν πράγματι υποβάθμιση μικρότερη από 1%, περίπου την ίδια όπως στα Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου.

Ως εκ τούτου, ενώ ο θερμικός συντελεστής για κρυσταλλικές Φ/Β κυψέλες είναι μία αρνητική σταθερά, περίπου -0,5% ανά °C, ο θερμικός συντελεστής Φ/Β κυψέλης τριπλής δομής είναι -0,21% ανά °C. Αυτό σημαίνει ότι σε μια κανονική θερμοκρασία κυψέλης των 60°C, η σχετική παραγωγή ισχύος μιας κρυσταλλικής μονάδας θα μειωθεί κατά περίπου 17% από την βαθμολογία STC, ενώ η παραγωγή ισχύος της μονάδας τριπλής δομής, θα μειωθεί κατά περίπου 4-6%. Το αποτέλεσμα αυτού του χαρακτηριστικού είναι ένα υψηλότερο επίπεδο παραγωγής ενέργειας σε κανονικές έως υψηλές θερμοκρασίες κυψελών.

Για παράδειγμα, η σύγκριση Φ/Β μονάδων άμορφου και μονοκρυσταλλικού πυριτίου που συνδέονται με το οικιστικό δίκτυο στην Ταϊλάνδη δείχνει σαφώς ότι οι μονάδες άμορφου πυριτίου ξεπερνούν τις μονάδες μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατά

περίπου 15% με όρους ετήσιας τελικής παραγωγής και μέσης απόδοσης (Σχήμα 2.11).

Η εν λόγω αύξηση της απόδοσης οφείλεται στην καλύτερη απόδοση στις θερμότερες περιόδους, και υπό διάχυτο φως, που είναι οι χαρακτηριστικές κλιματολογικές συνθήκες της περιόδου των βροχών στην Ταϊλάνδη. Παρομοίως, στην Ιαπωνία, μονάδες μονής δομής a-Si, ενός άλλου μεγάλου κατασκευαστή (Kaneka), αποφέρουν μεγαλύτερη ετήσια απόδοση από ότι τα πάνελ πολυ- / μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

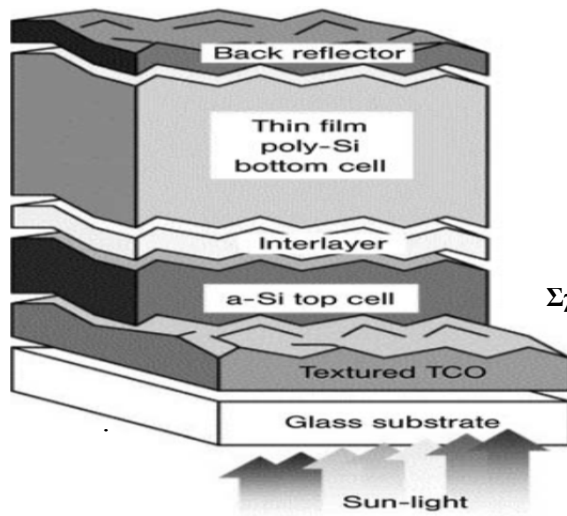


Σχήμα 2.11 Μηνιαίες τελικές τάσεις απόδοσης πάνω *ανά* χρόνο για a-Si και c-Si μονάδες στην Ταϊλάνδη (α) και στην Ιαπωνία (β), δείχνουν σαφώς ότι οι μονάδες a-Si έχουν σταθερά μεγαλύτερη απόδοση ενέργειας.

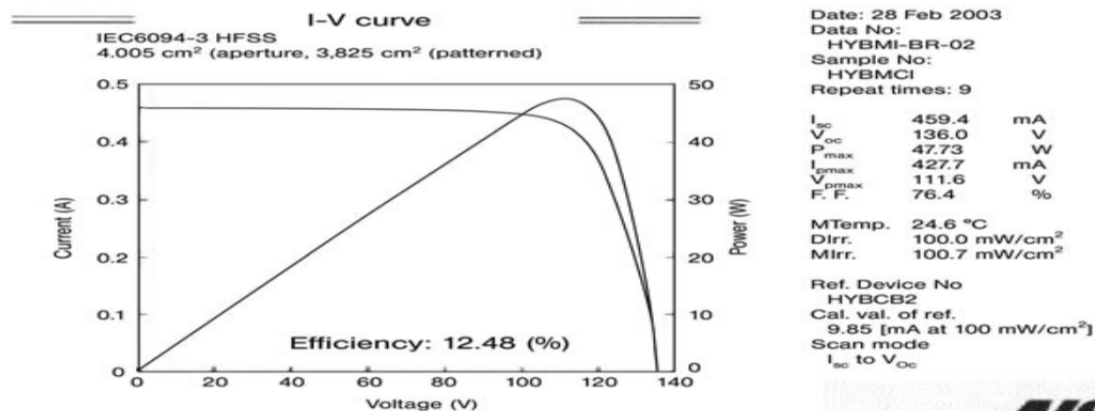
2.3 Λεπτά Φιλμ CIGS ($Cu(In, Ga)Se_2$), (Δισεληνοϊνδιογαλλιούχος Χαλκός,) σε Μεταλλικά Φύλλα

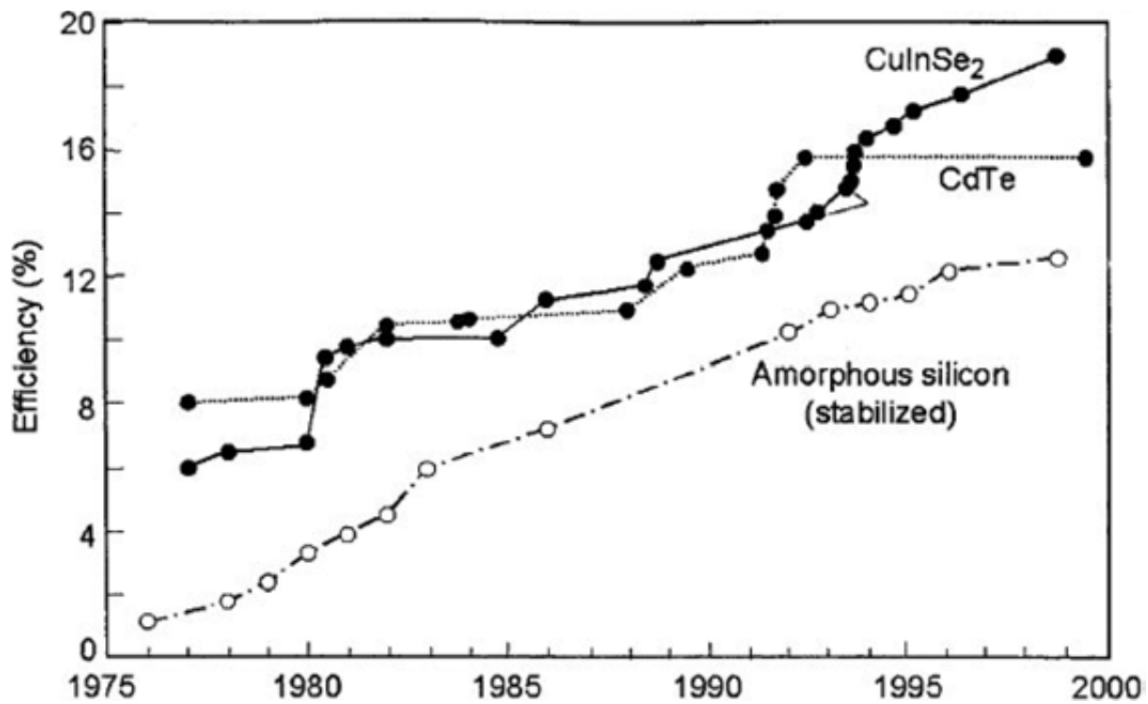
Από την αρχή της έρευνας στα μέσα της δεκαετίας του 1970, το CIGS μπήκε στην πρώτη γραμμή υλικών για την κατασκευή Λ/Φ σε σχέση με την αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυψελών (σχήμα 2.13). Πράγματι, τα Λ/Φ Φ/Β CdTe και $Cu(In, Ga)Se_2$ δείχνουν να έχουν την υψηλότερη απόδοση μεταξύ των Λ/Φ Φ/Β από την άποψη της αποδοτικότητας και στο επίπεδο μονάδας. Οι ηλιακές κυψέλες και μονάδες CIGS έχουν επιτύχει 19,5 και 13% αποτελεσματικότητα, αντίστοιχα. Παρομοίως, οι ηλιακές κυψέλες και μονάδες CdTe έχουν φθάσει το 16,5 και 10,2% αντίστοιχα.

Τα Λ/Φ CIGS ανήκουν στις ενώσεις χαλκού-χαλκοπυρίτη, των οποίων το ενεργειακό κενό μπορεί να τροποποιηθεί με τη μεταβολή της Κατηγορίας III των κατιόντων μεταξύ In, Ga, και Al και μεταξύ των ανιόντων Se και S. Μία ευρεία γκάμα ενεργειακών κενών μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συνδυασμούς με διαφορετική σύσταση, και δεδομένου ότι το φάσμα του ενδιαφέροντος του ενεργειακού κενού για την τεχνολογία αυτή είναι μεταξύ 1 και 1,7 eV, οι ηλιακές κυψέλες CIGS προσφέρουν την απαιτούμενη ευελιξία.



Σχήμα 2.12 Η επίδοση μιας ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ μονάδας.





Σχήμα 2.13 Εξέλιξη απόδοσης για διαφορετικές τεχνολογίες Λ/Φ Φ/Β.

Με αποδοτικότητα 19,5%, κάτω από κανονικές συνθήκες δοκιμής σε εργαστηριακή κλίμακα, το καλύτερο πάνελ CIGS είναι εξίσου αποτελεσματικό με το καλύτερο πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Ο πίνακας 2.2 συγκρίνει την αποτελεσματικότητα και την ισχύ των διαφόρων εμπορικών μονάδων CIGS, CIGSS, CdTe και δείχνει ότι οι επιδόσεις των πάνελ CIGS και CdTe πλησιάζουν αυτές των Φ/Β πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Πίνακας 2.2 Φ/Β μονάδες πολυκρυσταλλικού Λ/Φ.

Εταιρία	Είδος Φ/Β	Επιφάνεια ανοίγματος (cm ²)	Απόδοση (%)	Ισχύς (W)	Ημερ/νία
GlobalSolar	CIGS	8390	10,2	88,9	05/05
ShellSolar	CIGSS	7376	11,7	86,1	10/05
WürthSolar	CIGS	6500	13,0	84,6	06/04
FirstSolar	CdTe	6623	10,2	67,5	02/04
ShellSolarGmbH	CIGSS	4938	13,1	64,8	05/03
AntecSolar	CdTe	6633	7,3	52,3	06/04
ShellSolar	CIGSS	3626	12,8	46,5	03/03
ShowaShell	CIGS	3600	12,8	44,15	05/03

Οι εταιρείες που επιδιώκουν να παράγουν μονάδες CIGS έχουν ως αρχικό εμπορικό στόχο ένα εύρος απόδοσης 12 - 15%. Το εύρος αυτό αντισταθμίζει, με βέλτιστο τρόπο, το κόστος παραγωγής και την απόδοση. Επίσης σε αυτό το εύρος, οι

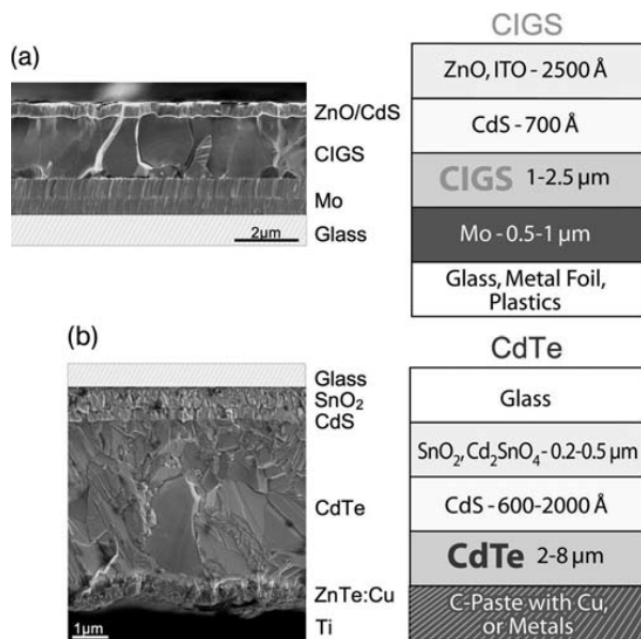
μονάδες CIGS είναι εξίσου αποτελεσματικές με τις πιο πολλές μονάδες πυριτίου της αγοράς.

Επιπλέον, καθώς δεν υπάρχει εγγενής μηχανισμός που να επιδεινώνει τις επιδόσεις των μονάδων, αυτές είναι εξαιρετικά σταθερές και παραδίδονται στους πελάτες με μια 25-ετή εγγύηση. Στην πραγματικότητα, οι κυψέλες συνήθως βελτιώνονται κατά τη διάρκεια της πραγματικής λειτουργίας τους, καθώς ένας μηχανισμός «αυτο-ίασης», χάρις στο *ελάττωμα χαλάρωσης*⁵ που οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης με τον χρόνο.

Η Global Solar Energy, στις Η.Π.Α, κατασκευάζει επίσης μονάδες Λ/Φ σε εύκαμπτα υποστρώματα.

Η μονολιθική ενσωμάτωση των Λ/Φ Φ/Β οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής σε σύγκριση με την τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου και, δεδομένου ότι οι μονάδες CdTe και CIGS μοιράζονται κοινά δομικά στοιχεία και παρόμοια κόστη παραγωγής ανά μονάδα, η απόδοσης της μονάδας θα είναι τελικά ο διακριτικός παράγοντας που καθορίζει το κόστος ανά watt.

Στην πραγματικότητα, αυτές οι δύο τεχνολογίες Λ/Φ έχουν μια κοινή δομή: υπόστρωμα, ηλεκτρόδιο βάσης, απορροφητή ακτινοβολίας, στρώμα επαφής, άνω ηλεκτρόδιο, στάδια σχεδιασμού μονολιθικής ενσωμάτωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14, όπου φαίνονται οι διατομές που μας παρέχουν αληθινή-φυσική οπτική των δομών που μας παρέχει η μικρογραφία ηλεκτρονικής σάρωσης.



Σχήμα 2.14 Δομές συσκευών (α) CIGS και (β) CdTe.

⁵ Ελάττωμα χαλάρωσης είναι ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την καθυστέρηση μεταξύ μιας εφαρμοζόμενης εξωτερικής πίεσης σ' ένα σύστημα και της αντίδρασής της. Όταν μια κατάσταση ισορροπίας, π.χ. ενός μοριακού συστήματος, υποβάλλεται σε μια απότομη αλλαγή, όπως π.χ. άνοδος της θερμοκρασίας, χρειάζεται χρόνος για το σύστημα να ισορροπήσει εκ νέου υπό τις νέες συνθήκες. Το φαινόμενο προκαλείται από ανακατανομή της ενέργειας, των ατόμων και των μορίων που αποτελούν το σύστημα.



Σχήμα 2.15 Νανοδομή νανοηλιακής μελάνης CIGS.

Ήδη από το 2000 μια ολοκληρωμένη έκθεση σχετικά με Λ/Φ Φ/Β CIGS κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα εμπόδια για μεγάλης κλίμακας παραγωγή και εμπορία μονάδων $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, είναι η πολυπλοκότητα του υλικού και οι διαδικασίες κατασκευής και ότι ήταν σημαντικό να βελτιωθεί περαιτέρω η απόδοσή τους με την αύξηση του ενεργειακού κενού ζώνης έτσι ώστε να καταφέρουν να γίνουν μεμονωμένες κυψέλες με υψηλότερη τάση.

Αυτό ακριβώς είναι που εφάρμοσε η εταιρεία, Nanosolar, η οποία έβγαλε πρώτη στο τέλος του 2007, μονάδες CIGS που ενσωματώνουν αυτήν την βελτίωση. Αυτό το σημαντικό βήμα, οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νανοδομημένης μελάνης CIGS που καθιστά δυνατή την απλή εκτύπωση του ημιαγωγού μιας ηλιακής κυψέλης υψηλής απόδοσης (Σχήμα 2.15).

Σαφώς, για την κατασκευή μονάδων CIGS χαμηλού κόστους, είναι επιθυμητό να μειωθεί η ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται και, ιδίως, να μειωθεί η χρήση του ινδίου (In), το οποίο είναι ένα σχετικά λιγότερο άφθονο και πιο ακριβό υλικό. Ο υψηλός συντελεστής απορρόφησης των 10^5 cm^{-1} για ενέργεια φωτός μεγαλύτερη από την ζώνη ενεργειακού κενού εξασφαλίζει ότι όλο το φως απορροφάται σε ένα φιλμ που έχει πάχος μικρότερο από 1 μm .

Η τεχνολογία εκτύπωσης CIGS βασίζεται στην βαφή ημιαγωγών με χρήση ειδικής μελάνης, που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1990, καθώς μόνο η τεχνολογία γρήγορης εκτύπωσης R2R μπορεί να εξασφαλίσει την υψηλή παραγωγικότητα, ενός πάνελ ανά λεπτό, για μονάδα παραγωγής που έχει σχεδιαστεί για την παραγωγή Φ/Β 10 MW το χρόνο.

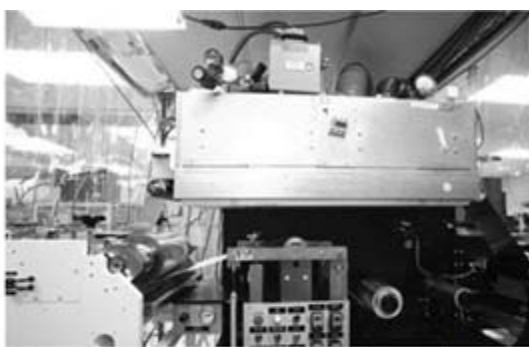
Εκείνη την εποχή, η κορωνίδα της τεχνολογίας παρήγαγε μονάδες CIGS πολύ υψηλής απόδοσης (πάνω από 12%) με την χρήση μελάνης.

Η νέα αυτή μελάνη αποτελείται από ένα σταθεροποιημένο ομοιογενές μείγμα CIGS νανοσωματιδίων με οργανική διασπορά. Η χημική σταθερότητα διασφαλίζει ότι οι ατομικές αναλογίες των τεσσάρων στοιχείων διατηρούνται όταν το μελάνι είναι τυπωμένο, ακόμη και σε μεγάλες επιφάνειες εναπόθεσης. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την παραγωγή ενός ημιαγωγού υψηλής ηλεκτρονικής ποιότητας και έρχεται σε αντίθεση με τις διαδικασίες εναπόθεσης εν κενώ, λόγω της φύσης των τεσσάρων στοιχείων του CIGS.

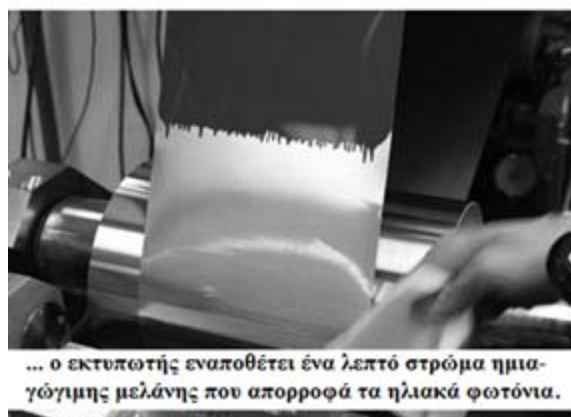
Γίνεται έτσι αποτελεσματική επεξεργασία ρολών που έχουν κάποια μέτρα πλάτος και μήκος κάποια μίλια, με πολύ υψηλή απόδοση (Σχήμα 2.16). Ένα βασικό πλεονέκτημα της επεξεργασίας R2R σε σύγκριση με λεπτές «φέτες» πυριτίου ή γυάλινες πλάκες είναι ότι, μετά τα πρώτα λίγα μέτρα από την προετοιμασία ενός νέου ρολού, η όλη διαδικασία αποκτά μια σταθερή κατάσταση η οποία μπορεί στη συνέχεια να διατηρηθεί για όλο το υπόλοιπο του ρολού, με αποτέλεσμα μια πολύ ομοιόμορφη διαδικασία εναπόθεσης σε ουσιαστικά ολόκληρο το ρολό.



Πώς φτιάχνεται: Σαν ρολά αλουμινοχαρτου



ελλάσματα αλουμινίου ρολάρουν σε πρέσες μεγέθους δωματίου



... ο εκτυπωτής εναποθέτει ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγικής μελάνης που απορροφά τα ηλιακά φωτόνια.



Στη συνέχεια, το ΛΦ περνά μέσα από άλλη πρέσα όπου επικαλύπτεται από ένα διάφανο αγωγίμο στρώμα πριν κοπεί σε φύλλα ηλιακών κυψελών.

Σχήμα 2.16 Παραγωγή R2R ηλιακών κυψελών CIGS.

Αντιθέτως, οι λεπτές «φέτες» πυριτίου ή πλάκες από γυαλί, , πρέπει να κινούνται μέσα - έξω σε κάθε σταθμό επεξεργασίας ξεχωριστά, εισάγοντας ανεπιθύμητη μεταβλητότητα στην διαδικασία και ως φυσικό επακόλουθο τη δημιουργία προβλημάτων ποιότητας (και συνεπώς του κόστους).

Έτσι οι ηλιακές μονάδες παράγονται με μηχανές εκτύπωσης που εναποθέτουν ένα στρώμα ηλιο-απορροφητικής νανομελάνης πάνω σε φύλλα μετάλλου τόσο λεπτό όσο του αλουμινοχαρτου (σχήμα 2.17).

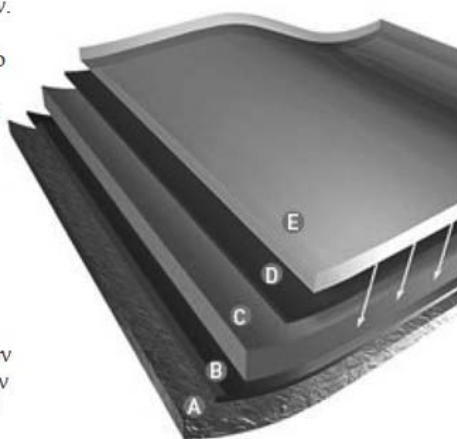
Ένα στρώμα βάσης αλουμινίου (A) στηρίζει το πρώτο ηλεκτρόδιο μολυβδαινίου (B). Έκθεση σε ακτινοβολία του ημιαγωγού CIGS (C) προκαλεί το φωτοηλεκτρονικό φαινόμενο, τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την ύλη (μέταλλα και μη μεταλλικά στερεά, υγρά ή αέρια) ως συνέπεια της απορρόφησης ενέργειας από

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πολύ μικρού μήκους κύματος, όπως το ορατό ή το υπεριώδες φως. Το στρώμα επαφής τύπου P / N του CdS (Δ) περνάει τα ηλεκτρόνια προς το διαφανές ηλεκτρόδιο οξειδίου του ψευδαργύρου (E, το υλικό παράθυρο) μέσω του οποίου τα ηλεκτρόνια φτάνουν το κύκλωμα τροφοδοσίας πριν επιστρέψουν πίσω στο πρώτο ηλεκτρόδιο.

Η ποσότητα του ρεύματος που μπορεί να υποστηρίξει ένα πάνελ είναι σημαντική επειδή οι περιορισμοί στην χωρητικότητα της έντασης ρεύματος επηρεάζουν αρνητικά το ισοζύγιο του κόστους του συστήματος και κατά συνέπεια επηρεάζουν αρνητικά και τα οικονομικά της παραγωγής ισχύος.



Πώς λειτουργεί: Μία ηλιακή κυψέλη είναι βασικά ένα σάντουιτς ημιαγωγών - που μετατρέπει τα φωτόνια του ήλιου σε ηλεκτρόνια - που περιβάλλεται από στρώματα ηλεκτροδίων. Το PowerSheet της Nanosolar, ένα στρώμα βάσης από αλουμίνιο [A] υποστηρίζει το πρώτο από αυτά τα ηλεκτρόδια, ένα επίστρωμα του μολυβδαινίου [B]. Το φως χτυπά τον ημιαγωγό [C], «κλωτσώντας» χαλαρά ηλεκτρόνια. Το στρώμα επαφής τύπου P / N [Δ] περνάει τα ηλεκτρόνια πάνω στο διαφανές ηλεκτρόδιο οξειδίου του ψευδαργύρου [E], που τα στέλνει στην τροφοδοσία του Xbox μας προτού να έρθουν πίσω στο πρώτο ηλεκτρόδιο, ολοκληρώνοντας το κύκλωμα. Η Nanosolar δημιούργησε την τέλεια σύνθεση για την ημιαγωγική μελάνη, ένα μίγμα νανοσωματιδίων χαλκού, ινδίου, γαλλίου και σεληνίου που, όταν εκτυπώνεται, αυτο-συναρμολογείται πάνω στο φύλλο σε ομοιόμορφο στρώμα, που είναι ένα εκατοστό του πάχους του απορροφητικού στρώματος στις κλασικές κυψέλες.



Σχήμα 2.17 Η ηλιακή κυψέλη PowerSheet της Nanosolar είναι ένα «σάντουιτς» ημιαγωγών που περιβάλλονται από ηλεκτρόδια.

Το λεπτό υπόστρωμα αλουμινίου συγκεντρώνει δύο πολύ βασικά πλεονεκτήματα, έχει χαμηλό κόστος και είναι εξαιρετικά αγωγίμο (πάνω από 20 φορές μεγαλύτερη αγωγιμότητα από αυτήν του ανοξείδωτου χάλυβα), και ως εκ τούτου δίνει τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης του κόστους για το ηλεκτρόδιο λεπτού φιλμ του κάτω μέρους της ηλιακής κυψέλης, αποφεύγοντας την ανάγκη απόθεσης ενός ξεχωριστού, ακριβού στρώματος ηλεκτροδίου στο κάτω μέρος (όπως απαιτείται για ένα μη αγωγίμο υπόστρωμα όπως το γυαλί). Επιπλέον, το μεταλλικό φύλλο επιτρέπει τη συναρμολόγηση των κυψελών από συνδυασμό μεμονωμένων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών.

2.4 Λεπτά Φιλμ Τελλουριούχου Καδμίου (CdTe)

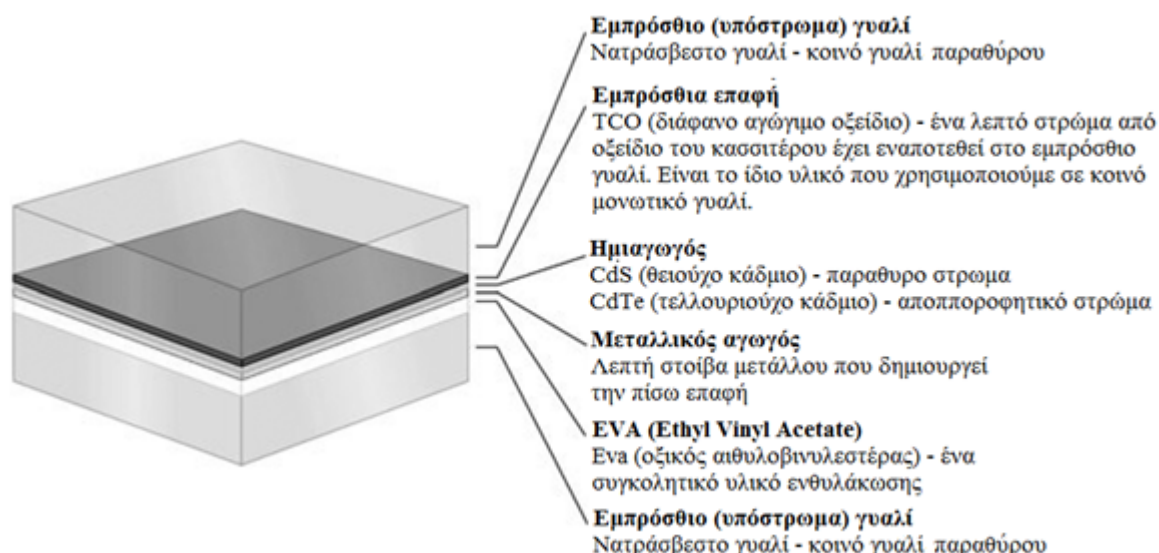
Η ζώνη ενεργειακού κενού του CdTe, στα 1.45 eV είναι μια καλή αντιστοιχία για το ηλιακό φάσμα και ως εκ τούτου δίνει τη δυνατότητα μετατροπής της περισσότερης ληφθείσας ενέργειας σε σχέση με την κατώτερη ζώνη ενεργειακού κενού του πυριτίου (1,20 eV) που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν. Ως αποτέλεσμα, το Λ/Φ CdTe είναι σε θέση να μετατρέψει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια με ποσοστό αποδοτικότητας συγκρίσιμο με αυτό των τεχνολογιών πυριτίου, με χρήση περίπου μόνο του 1% του απαιτούμενου ημιαγωγίμου υλικού.

Στην πραγματική συσκευή ηλιακής κυψέλης (Σχήμα 2.18), αυτό το ενεργειακό διάκενο ζώνης μπορεί να διαφέρει κάπως ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με το CdS (2,4 eV διάκενο ζώνης) κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Μονάδες Φ/Β CdTe / CdS φαίνεται να είναι περιβαλλοντικά πιο φιλικές από ότι όλες οι άλλες τρέχουσες χρήσεις του Cd. Πρώτον, τόσο το κάδμιο όσο και το τελλούριο στο CdTe παράγονται ως υποπροϊόντα των διαδικασιών εξόρυξης (Cd από την τήξη αποβλήτων ψευδαργύρου και Te από την δύλιση χαλκού), εμποδίζοντας έτσι δυνητικά την είσοδο στο περιβάλλον του επικίνδυνου καδμίου. Επιπλέον, κατά τη λειτουργία τους οι μονάδες δεν παράγουν ρύπους, και ως εκ τούτου δεν παρουσιάζουν κανένα κίνδυνο για την υγεία και το περιβάλλον. Η πλήρης ανακύκλωση των μονάδων στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους επιλύει τυχόν περιβαλλοντικές ανησυχίες, ενώ, εκτοπίζοντας τα ορυκτά καύσιμα, οι Φ/Β μονάδες Cd Te προσφέρουν ένα καθαρό όφελος για το περιβάλλον.

Η τυπική δομή είναι γυαλί/SnO₂/CdS/CdTe/επαφές. Για το απορροφητικό στρώμα εμπορικών προϊόντων χρησιμοποιείται είτε συν-εξάτμιση ή διαδικασία δύο σταδίων, όπως η εναπόθεση των πρόδρομων ουσιών με *καθοδικό διασκορπισμό*⁶. Οι

⁶ Ο καθοδικός διασκορπισμός είναι μια διαδικασία κατά την οποία εκτινάσσονται άτομα από ένα στερεό υλικό-στόχο λόγω του βομβαρδισμού του στόχου με ενεργητικά σωματίδια. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για την απόθεση Λ/Φ.

πιο κοινές μέθοδοι εναπόθεσης για τις συσκευές CdTe περιλαμβάνουν την απόκτηση επικαλυμμένου γυαλιού με SnO_2 , ακολουθούμενες από χημικό-λουτρό απόθεσης του CdS. Το απορροφητικό Λ/Φ CdTe συνήθως εφαρμόζεται με εξάχνωση από κοντινές αποστάσεις, εναπόθεση με μεταφορά ατμών, ή ηλεκτρική απόθεση, ακολουθούμενη από κατεργασία με CdCl_2 .

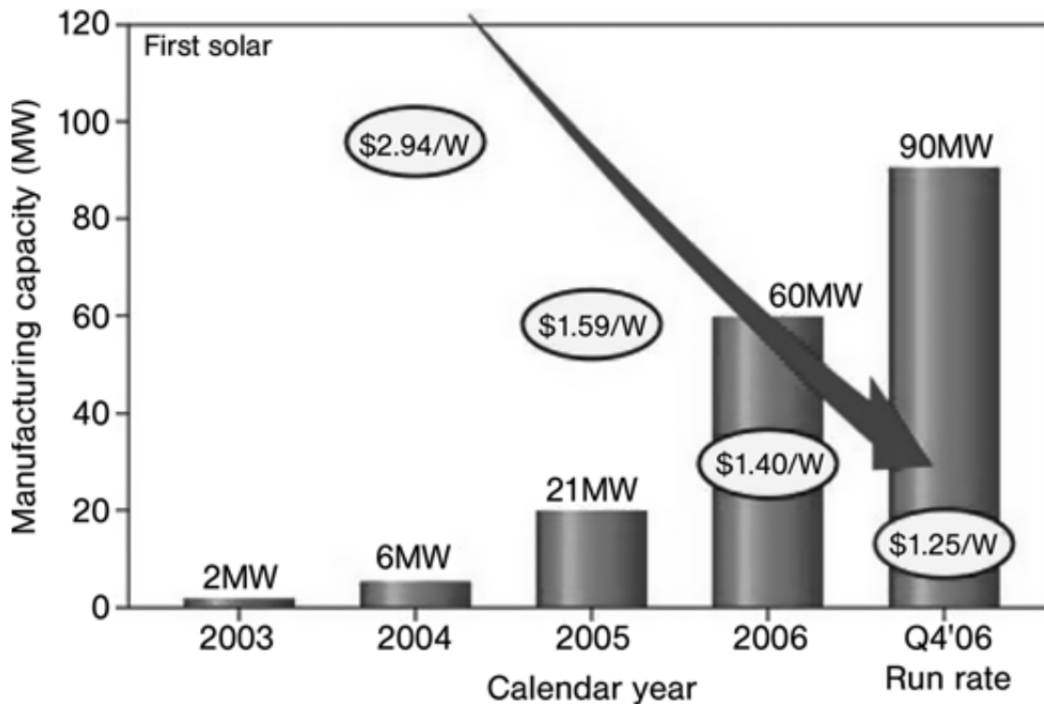


Σχήμα 2.18 Τα υλικά ημιαγωγών (CdTe και CdS) σε μία τυπική μονάδα προέρχονται από τα υποπροϊόντα εργασιών εξόρυξης και ενσωματώνονται στο 1% του ημιαγωγίμου υλικού που χρησιμοποιείται σε ένα τυπικό ηλιακό πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου.

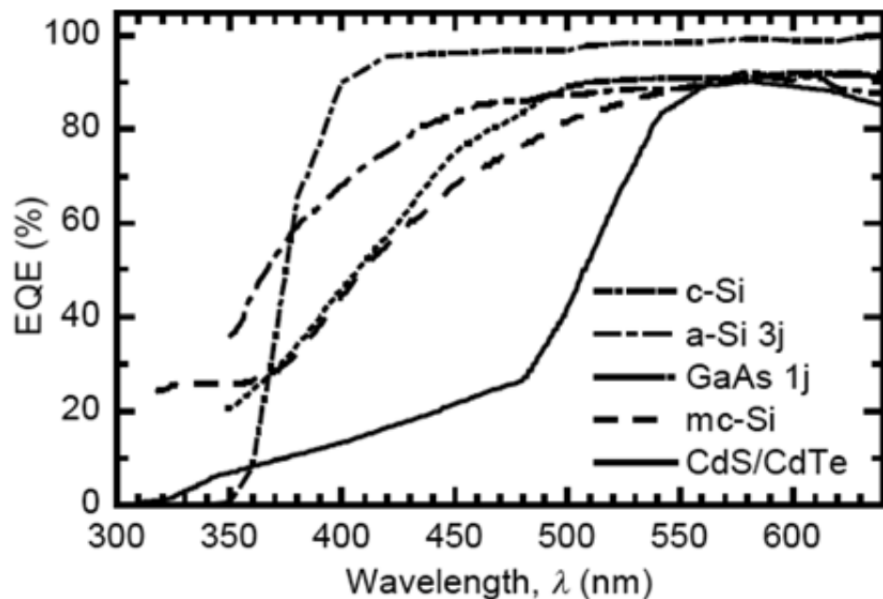
Τότε εφαρμόζεται το πίσω μέρος επαφής μετά τη χάραξη της πίσω επιφάνειας του CdTe. Η φύση των επαφών στο πίσω μέρος ποικίλει - από μια πάστα άνθρακα που περιέχει τελλουριούχο χαλκό (Cu_xTe) και τελλουριούχο υδράργυρο HgTe , σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα με Cu.

Οι παραδοσιακές ηλιακές μονάδες έχουν γίνει λιγότερο αποτελεσματικές στην μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία των κυψελών τους. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα του CdTe είναι λιγότερο ευαίσθητη στην αύξηση της θερμοκρασίας των κυψελών, επιτρέποντας στις ηλιακές μονάδες CdTe την παραγωγή σχετικά περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας υπό υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και ως εκ τούτου υψηλή θερμοκρασία κυψελών.

Οι μονάδες CdTe απορροφούν επίσης χαμηλό και διάχυτο φως και έτσι μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό περισσότερο αποτελεσματικά αυτό το φως υπό ειδικές καιρικές συνθήκες (συννεφιά, αυγή, σούρουπο), όπου οι συμβατικές κυψέλες λειτουργούν λιγότερο αποτελεσματικά. Ως αποτέλεσμα, κάτω από πραγματικές συνθήκες οι μονάδες CdTe θα παράγουν γενικά περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από μία συμβατική ηλιακή μονάδα με παρόμοιες τιμές ονομαστικής ισχύος.



Σχήμα 2.19 Παραγωγική ικανότητα Λ/Φ CdTe και μείωση κόστους σε σχέση με το ημερολογιακό έτος.



Σχήμα 2.20 Ο εξωτερικός κβαντικός βαθμός απόδοσης (EQE) των διαφορετικών τύπων εμπορικών Φ/Β μονάδων.

Τομείς έρευνας περιλαμβάνουν ανομοιομορφίες στο φιλμ CdTe και τις επιπτώσεις τους στις επιδόσεις της μονάδας, στα λεπτά απορροφητικά στρώματα CdTe, στην ενδοδιάχυση στην διεπαφή CdS / CdTe, όπου το S διαχέεται στο φιλμ CdTe, καθώς και στον ρόλο νόθευσης του Cu που χρησιμοποιείται συνήθως στις διαδικασίες της οπίσθιας επαφής.

Για παράδειγμα, στις κυψέλες Λ/Φ CdTe / CdS, το άμεσο διάκενο ζώνης του ημιαγωγού CdS με $E_g = 2,4 \text{ eV}$ απορροφά έντονα το μεγαλύτερο μέρος του φωτός μικρού μήκους κυμάτων (ιώδες σε μπλε-πράσινο) για να μπορέσει να είναι χρήσιμο στο να απορροφηθεί στη συνέχεια στο CdTe. Ως αποτέλεσμα, οι εμπορικές Φ/Β μονάδες παρουσιάζουν κακό εξωτερικό κβαντικό βαθμό απόδοσης (**EQE**) σε μικρά μήκη κύματος (σχήμα 2.20), μειώνοντας έτσι την ποσότητα του φωτορεύματος που μπορεί να παραχθεί από αυτό το μέρος του ηλιακού φάσματος.

Ωστόσο, η προσθήκη ενός μείγματος μέχρι τέσσερις φθορίζουσες οργανικές χρωστικές ουσίες, οι οποίες είναι φθηνές και φωτοσταθερές, αυξάνει σημαντικά την πυκνότητα ρεύματος βραχυκύκλωσης (J_{SC}) ηλιακών κυψελών CdS / CdTe κατά $\Delta J_{SC} = 3.1 \text{ mA cm}^{-2}$, που αντιστοιχεί σε αύξηση απόδοσης μετατροπής (η) από 9,6 σε 11,2% σύμφωνα με ηλιακή ακτινοβολία οπτικής μάζας 1,5 (AM1.5G).

Το στρώμα χρωστικών λειτουργεί ως παράγοντας μείωσης φθορισμού (**LDS**) απορροφώντας τα φωτόνια μικρού μήκους κύματος που δεν θα είχαν συμβάλει στην δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής στην ηλιακή κυψέλη, και στην εκ νέου εκπομπή τους σε μεγαλύτερου μήκους κύματος, όπου η Φ/Β συσκευή διαθέτει ένα πολύ υψηλότερο EQE. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή στρωμάτων LDS δεν απαιτεί καμία αλλαγή στη δομή της ηλιακής κυψέλης.

2.5 Λεπτά Φιλμ CIS

Οι μονάδες **CIS** (Copper Indium Selenium– Ινδιοσεληνιούχος Χαλκός) αποτελούνται από πολλαπλές ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες στη σειρά. Αυτές απορροφούν ένα ευρύ φάσμα φωτός και εξασφαλίζουν μέγιστη παραγωγή ισχύος, ακόμη και με δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Δυνάμει της υψηλής αξιοπιστίας και της αντοχής τους, οι ηλιακές μονάδες CIS είναι κατάλληλες για σχεδόν όλους τους τομείς εφαρμογής τους και μεγεθών των ηλιακών συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Μια τυπική κυψέλη έχει τη δομή όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21.

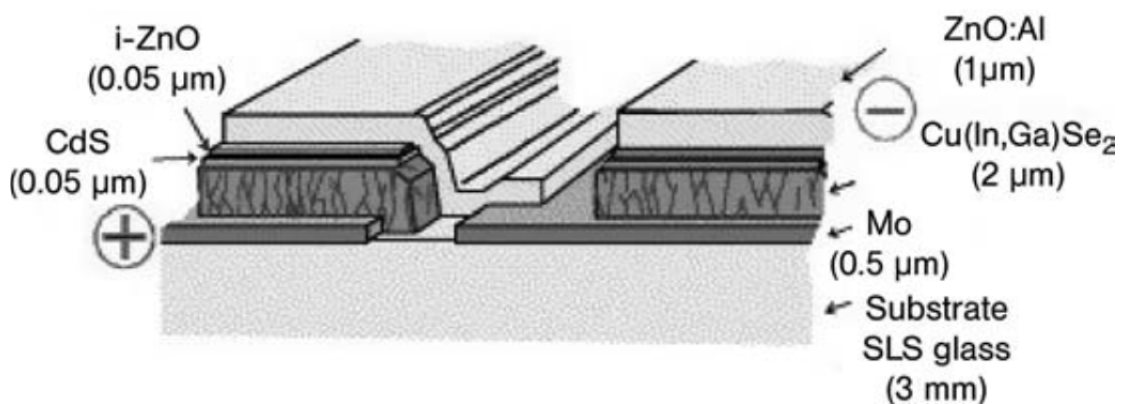
Μετά από μια πρώτη, σύντομη φάση βελτιστοποίησης, οι πρώτες μονάδες κατασκευάστηκαν και καταμετρήθηκαν με απόδοση ήδη πάνω από 8% το 2001. Η μέση απόδοση μονάδας CIS από τότε έχει αυξηθεί σε 9-10% το 2002, 10-11% το 2003 και 11,0 - 11,5% το 2004 και το 2005. Οι μέγιστες τιμές απόδοσής τους έχουν ήδη φθάσει στο 13%, οι οποίες αντιστοιχούν σε περίπου 85W για τη βασική λειτουργική μονάδα σε STC.

Υποθέτοντας ρεαλιστικές περαιτέρω βελτιώσεις, αναμένεται ότι ο υπάρχων εξοπλισμός και οι διαδικασίες μπορεί να φτάσουν, κατά μέσο όρο απόδοσης μονάδας, τουλάχιστον το 12,5% μέσα στα επόμενα δύο χρόνια. Η προσθήκη τροποποιήσεων της διαδικασίας των μονάδων CIS, που έχουν ήδη αποδειχθεί στο εργαστήριο, και η περαιτέρω βελτίωση της επαφής στρωμάτων Mo και ZnO, σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση των απωλειών σχεδιασμού, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι

ρεαλιστικό να κατασκευαστούν μονάδες CIS με απόδοση 14-15% μέσα στην επόμενη δεκαετία.

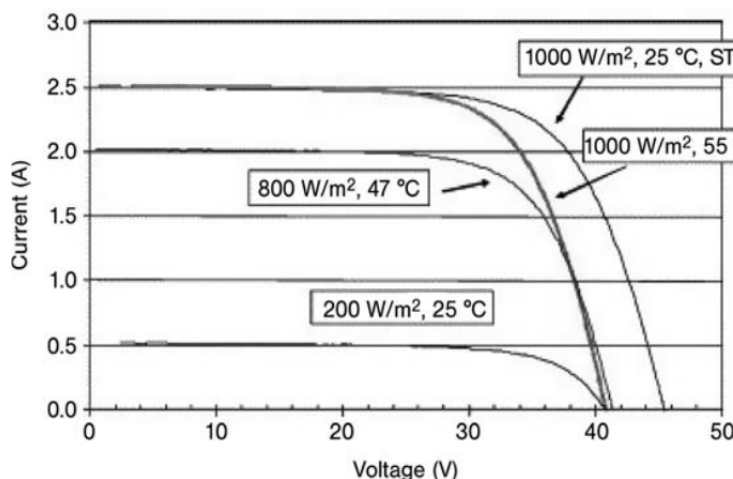
Μια σημαντική πτυχή είναι η μείωση του κόστους των υλικών. Ως εκ τούτου, η διαδικασία εναπόθεσης ZnO βελτιώνεται, με στόχο την υψηλότερη απόδοση υλικού και τη χρήση του Zn σε ένα αντιδραστικό περιβάλλον εναπόθεσης με καθοδικό διασκορπισμό. Ταυτοχρόνως οι προσπάθειες στοχεύουν στη χρήση υλικών χαμηλότερης καθαρότητας και τη μείωση του πάχους του φιλμ για όλες τις διεργασίες εναπόθεσης.

Μια λεπτομερής μελέτη κόστους υπολόγισε, περίπου πριν από δέκα χρόνια, ότι οι μονάδες CIS έχουν δυνατότητα κόστους παραγωγής περίπου 0,70 €/ Wp για όγκο παραγωγής 50 MWp, ενώ κατά μέσο όρο η απόδοσή τους φτάνει το 12% και η συνολική απόδοση της διαδικασίας το 85%.



Σχήμα 2.21 Σχέδιο κυψέλης CIS και εφαρμογή διασύνδεσης δύο κυψελών σε μονάδα παραγωγής CIS.

Και πάλι, δεδομένου ότι οι κανονικές συνθήκες δοκιμής (STC) ακτινοβολίας 1000 W/m^2 στους 25°C δεν αντιπροσωπεύουν πραγματικές εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας, οι μονάδες CIS υπό ρεαλιστικές συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας (σχήμα 2.22), όπως ήταν αναμενόμενο, έχουν χαμηλότερη τάση ανοικτού κυκλώματος σε υψηλότερες θερμοκρασίες, αλλά το ρεύμα παραμένει στο ίδιο επίπεδο καθώς και η χαρακτηριστική καμπύλη I-V διατηρείται περίπου ίδια.



Σχήμα 2.22 Χαρακτηριστική I-V μιας τυπικής μονάδας CIS σε ρεαλιστικές συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας. Περιλαμβάνεται, για σύγκριση, η χαρακτηριστική καμπύλη σε STC.

Η καμπύλη μετριέται στα 200Wm^{-2} και 25°C στο σχήμα 2.22 αντιπροσωπεύοντας συννεφιά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στο ένα πέμπτο της ακτινοβολίας, η μονάδα εξακολουθεί να παράγει το ένα πέμπτο του ρεύματος. Λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας, η τάση ανοικτού κυκλώματος παραμένει ίδια, στα 40V, όση θα ήταν και μια ηλιόλουστη ημέρα. Η καμπύλη στα 800Wm^{-2} και 47°C παρέχει εύλογα, ενδιάμεσα αποτελέσματα.

Τέλος, η σύγκριση της CIS τεχνολογία με τις μονάδες κρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου κάτω από πραγματικές συνθήκες στη Γερμανία, δείχνει πολύ καλή απόδοση ενέργειας με την τεχνολογία CIS.. Η απόδοση kWh / kWp εγκαταστάσεων CIS είναι η υψηλότερη, ακόμα και σε σύγκριση εγκαταστάσεων υψηλής ποιότητας μονοκρυσταλλικού πυριτίου, λόγω των καλών επιδόσεων κάτω από συνθήκες χαμηλού φωτισμού και καλύτερου (δηλαδή, χαμηλότερου) συντελεστή θερμοκρασίας.

Σε γενικές γραμμές, η αισθητική εμφάνιση, μαύρο ματ, των νέων μονάδων και η ευελιξία τους όσον αφορά το μέγεθος και το σχήμα τις καθιστά ιδανικό στοιχείο κατασκευής και σχεδιασμού. Εκτός από την ενσωμάτωση στα κτίρια, χάρη στην αισθητική τους εμφάνιση και την ευελιξία ως προς το μέγεθος, οι μονάδες CIS γίνονται ιδιαίτερα κατάλληλες για προσαρμοσμένη ενσωμάτωση σε προϊόντα που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή (σχήμα 2.24). Η ειδική τεχνική παραγωγής επιτρέπει τον συνδυασμό εκείνων των τεχνικών ιδιοτήτων που απαιτούνται ως λύση του συστήματος ακόμη και κατά τη διάρκεια της παραγωγής.

Μια μελλοντική προοπτική είναι η αντικατάσταση του υποστρώματος γυαλιού και / ή το μπροστινό γυαλί από άλλα υλικά, για παράδειγμα, εύκαμπτα υλικά όπως το μέταλλο ή πλαστικά φύλλα. Η επεξεργασία πρέπει να τροποποιηθεί εν μέρει για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις αυτών των υλικών. Τα αποτελέσματα δεν είναι ακόμη αρκετά καλά για να μεταφερθούν οι βελτιώσεις την παραγωγή.

Οι μονάδες CIS δεύτερης γενιάς επίσης παράγονται στο Τοργκάου, Γερμανία, σε ένα εργοστάσιο με ετήσια δυναμικότητα 20 MWp, από μια επιχείρηση αποτελούμενη από τις Avancis, Shell και Saint-Gobain. Η μέση απόδοση των μεγάλων μονάδων (1ft x 4 ft) σε πιλοτική παραγωγή είναι σχεδόν 13%. Η επίδοση αυτή είναι συγκρίσιμη με πολλές μονάδες που βασίζονται στο κρυσταλλικό πυρίτιο, και είναι πολύ καλύτερες από τις επιδόσεις που αναφέρθηκαν από οποιονδήποτε τύπου μονάδα Λ/Φ ανταγωνιστικών τεχνολογιών.



Σχήμα 2.23 Ηλιακά ρολά. Οι μονάδες αυτές παράγουν ονομαστική ισχύ 2Wp και κάθε μονάδα έχει διαστάσεις 53 x 600mm².

3. Οργανικές Ηλιακές Κυψέλες Λεπτού Φιλμ

3.1 Οργανικές Ηλιακές Κυψέλες

Σε μια κλασική ανόργανη ηλιακή κυψέλη, ασθενή δεσμευμένα ζεύγη Coulomb του φορέα φορτίου (ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή) δημιουργούνται από την απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία. Στους οργανικούς ημιαγωγούς, ο διαχωρισμός των αντίθετων φορτίων είναι πολύ πιο ασθενής, όσο η διηλεκτρική σταθερά είναι χαμηλότερη. Αυτό οδηγεί σε μια πολύ ισχυρότερη αλληλεπίδραση των φωτοπαραχθέντων θετικών και αρνητικών φορτίων. Ως εκ τούτου, η κύρια οπτική διέγερση στα οργανικά υλικά είναι ένα *ατομικό εξιτόνιο*⁷, δηλαδή, ένα ισχυρά συνδεδεμένο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Δεδομένου ότι αυτή η σύνδεση είναι πιο δύσκολη να ξεπεραστεί από ότι σε ανόργανα συστήματα, η φιλοσοφία των οργανικών ηλιακών κυψελών πρέπει να είναι διαφορετική.

Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ των οργανικών και ανόργανων ηλιακών κυψελών είναι ότι οι οργανικοί ημιαγωγοί είναι *άμορφοι*⁸ και, συνεπώς είναι δυσκολότερη η μεταφορά φορτίων από ό, τι σε κρυστάλλους.

Ένα πλεονέκτημα, όμως, είναι η ικανότητα να συντίθενται ειδικές οργανικές ουσίες ανά περίπτωση, οι οποίες επιτρέπουν λεπτομερή ρύθμιση του εύρους απορρόφησης και των ιδιοτήτων μεταφοράς φορτίου, καθώς και αυτοσυναρμολόγηση μέσω τεχνικών της νανοχημείας. Επιπλέον, πολύ λεπτά (100 nm) οργανικά Φιλμ μπορούν να απορροφούν όλο το προσπίπτον φως (εντός του εύρους απορρόφησης τους), το οποίο θα πρέπει να συγκριθεί με ένα μήκος απορρόφησης περίπου 300 μm για μία κλασική παχιά «φέτα» κρυσταλλικού πυριτίου, και 1 μm για λεπτό Φιλμ πολυκρυσταλλικού $CuInSe_2$.

Εφευρέθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι πρώτες οργανικές ηλιακές κυψέλες με αρκετή παραγωγή ρεύματος όπου βασίστηκαν σε μια ενεργή διπλοστιβάδα από υλικά δότη και δέκτη. Το φως συνήθως απορροφάται στο λεγόμενο υλικό του δότη, ένα μικρό μόριο αγωγής της οπής ή ένα *συζευγμένο πολυμερές*⁹. Τα φωτοπαραχθέντα ατομικά εξιτόνια διαχέονται μέσα στον δότη προς την διεπαφή με το δεύτερο υλικό, τον αποδέκτη, ο οποίος συνήθως είναι ισχυρά ηλεκτραρνητικός.

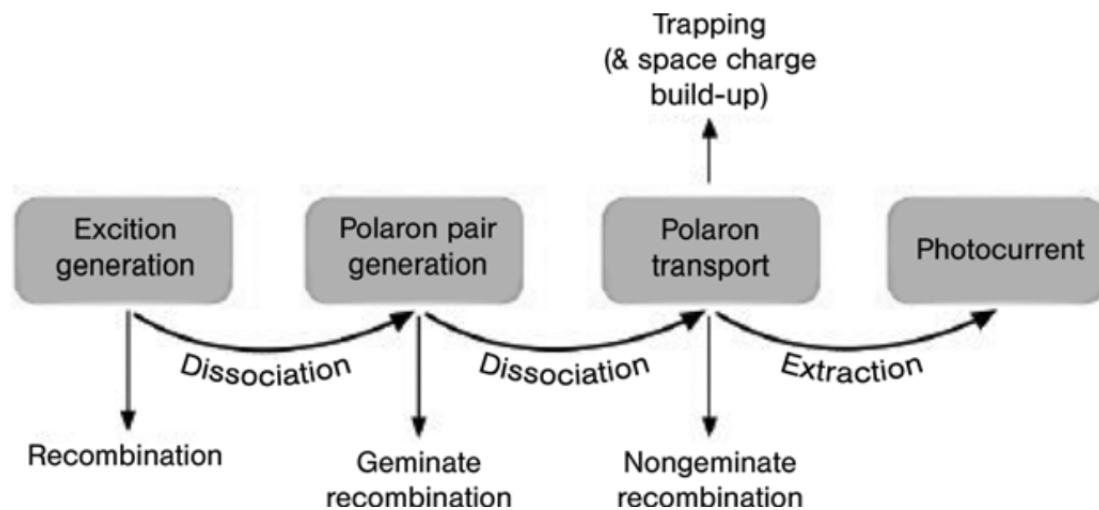
⁷ Το εξιτόνιο είναι μια κατάσταση δεσμού όπου ένα ηλεκτρόνιο και μία οπή έλκονται μεταξύ τους με ηλεκτροστατική δύναμη Coulomb. Η κατάσταση της ιδιοτροφορμής, "spin", των δύο φορτίων είναι αρκετά σημαντική. Όταν το άθροισμα των δύο διανυσμάτων "spin" είναι μηδέν, έχουμε ένα μονοατομικό εξιτόνιο. Τα μονοατομικά εξιτόνια είναι τα μόνα εξιτόνια που δημιουργούνται από φωτισμό.

⁸ Άμορφος ημιαγωγός είναι ο ημιαγωγός εκείνος που δεν έχει κρυσταλλική δομή.

⁹ Συζευγμένο πολυμερές είναι ένα πολυμερές που περιέχει δύο ή περισσότερους διπλούς δεσμούς που εναλλάσσονται με μονούς δεσμούς.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός υλικού δέκτη ηλεκτρονίων είναι το **buckminsterfullerene** γνωστό και ως C_{60} , είναι ένα σφαιρικό μόριο φουλλερενίων με τον τύπο C_{60} .

Το εξιτόνιο κινείται με διάχυση προς την *ετεροδομή*¹⁰ δότη-δέκτη, όπου η μεταφορά του ηλεκτρονίου στο μόριο του δέκτη είναι ενεργειακά ευνοημένη (Διάγραμμα 3.1). Αυτή η μεταφορά φορτίου είναι ταχύτατη (μπορεί να είναι ταχύτερη από 100 fs σε πολυμερή συστήματα φουλλερενίων) και πολύ αποτελεσματική, καθώς οι εναλλακτικοί μηχανισμοί απώλειας είναι πολύ πιο αργοί.



Σχήμα 3.1 Βήματα από την παραγωγή εξιτονίων σε φωτορεύμα στις οργανικές ηλιακές κυψέλες.

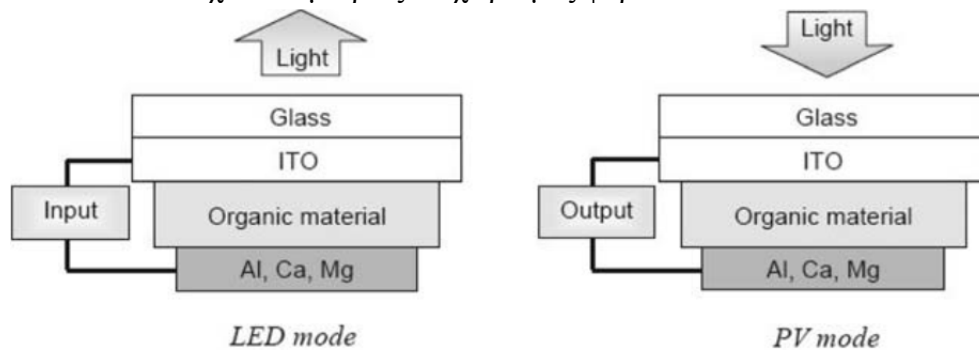
Το εξιτόνιο έχει πλέον διαχωριστεί επειδή η οπή παραμένει στο πολυμερές. Ακόμα και τώρα που βρίσκονται σε δύο διαφορετικά υλικά, το ηλεκτρόνιο και η οπή είναι ακόμα ζεύγος, έστω και αν ο ρυθμός ανασυνδυασμού έχει σαφώς μειωθεί (διάρκεια ζωής: από χιλιοστό έως εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου) σε σύγκριση με το ατομικό εξιτόνιο (διάρκεια ζωής: νανοδευτερόλεπτα).

Για την τελική αποσύνδεση του ζεύγους φορτίου και για την αποφυγή ανασυνδυασμού μονομορίου, είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου για να ξεπεραστεί η έλξη Coulomb, και αυτή η εξάρτηση εκδηλώνεται με το χαρακτηριστικό, έντονα πεδιοεξαρτώμενο φωτορεύμα των οργανικών ηλιακών κυψελών. Ένα τέτοιο πεδίο είναι ένα εσωτερικό πεδίο, το οποίο επηρεάζεται από την ενσωματωμένη δυνατότητα λόγω της διαφοράς συνάρτησης έργου μεταξύ των ηλεκτροδίων.

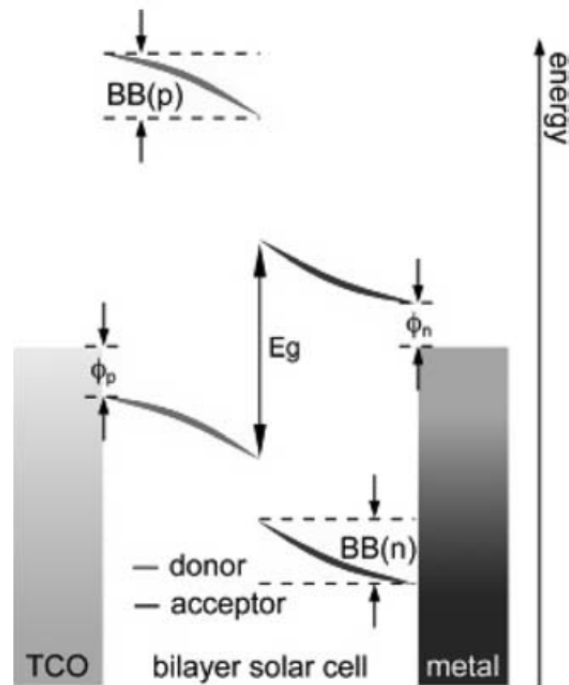
Στην πράξη, το φωτοδραστικό οργανικό στρώμα είναι τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο διαφορετικά ηλεκτρόδια, με το ανώτερο να είναι διαφανές (Σχήμα 3.2). Ο διαχωρισμός φορτίων λαμβάνει χώρα στην οργανική φάση, με την άνοδο και την

¹⁰ Μια ετεροδομή είναι η διεπαφή που εμφανίζεται ανάμεσα σε δυο στρώματα ή περιοχές ανόμοιων κρυσταλλικών ημιαγωγών. Αυτά τα ημιαγωγά υλικά έχουν άνισα ενεργειακά κενά.

κάθοδο που θα επιλεγούν να έχουν μεγάλη διαφορά (ασύμμετρη) συνάρτησης έργου και έτσι να ενισχυθεί ο μέτριος διαχωρισμός φορτίων.



Σχήμα 3.2 Οργανικά υλικά ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια μπορούν να λειτουργήσουν σαν φωτοβολταϊκά ή δίοδοι φωτοεκπομπής (LED). Στην πρώτη περίπτωση τα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο και οι οπές στο ηλεκτρόδιο ITO.



Σχήμα 3.3 Σχηματικό διάγραμμα ενεργειακού επιπέδου μιας διστρωματικής ηλιακής κυψέλης (ϕ_p : συνάρτηση έργου, E_g : διάκενο ζώνης, $BB(n)$: πλάτος ζώνης αραιώσης).

Το σχήμα 3.3 δείχνει το διάγραμμα ενεργειακού επιπέδου μιας διστρωματικής ηλιακής κυψέλης. Η άνοδος είναι κατασκευασμένη από TCO (διαφανή αγώγιμα οξειδία), στη συνέχεια, ακολουθούν ο δότης και ο δέκτης, και τέλος η μεταλλική κάθοδος. Το εξιόνιο είναι φωτοπαραχθέν στον δότη, που μπορεί να διαχέεται και να διαχωρίζεται στην διεπαφή με τον αποδέκτη. Το προκύπτον ζεύγος πόλων στη συνέχεια διαχωρίζεται ενεργειακά από το αποτελεσματικό διάκενο ζώνης των οργανικών ηλιακών κυψελών.

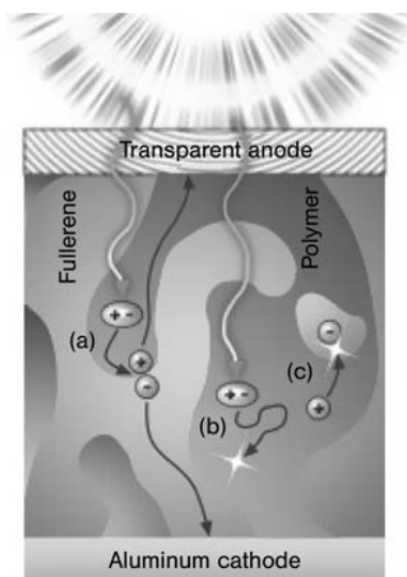
Η πρώτη οργανική διστρωματική ηλιακή κυψέλη αποτελούμενη από δύο συζευγμένα μικρά μόρια, επέτυχε απόδοση μετατροπής ισχύος **PCE (Power Conversion Efficiency)** της τάξης του 1%. Μια γόνιμη τεχνική για την απόκτηση

ενός πιο αποτελεσματικού διαχωρισμού φορτίων είναι η δημιουργία διόδων διστρωματικού πολυμερούς μέσω ελασματοποίησης που ακολουθείται από ελεγχόμενη *ανόπτηση*¹¹, παράγοντας μία κυψέλη με σχεδόν διπλάσια PCE (1,9%).

Ο περιοριστικός παράγοντας σε αυτήν την τεχνική είναι ότι, για την πλήρη απορρόφηση του προσπίπτοντος φωτός, το πάχος στρώματος του απορροφώντος υλικού πρέπει να είναι της τάξης των 100 nm μήκους απορρόφησης, περίπου. Αυτό είναι πολύ περισσότερο από τα 10nm μήκους διάχυσης των εξιτονίων. Δεδομένου ότι, σε γενικές γραμμές, το μήκος διάχυσης του εξιτονίου είναι πολύ μικρότερο από το μήκος απορρόφησης, το δυναμικό της διστρωματικής ηλιακής κυψέλης, είναι δύσκολο να αξιοποιηθεί.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, εισήχθη η έννοια της ηλιακής κυψέλης μαζικής ετεροδομής **BHJ** (**Bulk HeteroJunction**), λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλό μήκος διάχυσης του εξιτονίου σε *αδιάτακτους οργανικούς ημιαγωγούς*¹², καθώς και το απαιτούμενο πάχος για επαρκή απορρόφηση φωτός.

Η προσέγγιση αυτή διαθέτει μία κατανεμημένη δομή μεταξύ των υλικών δότη και δέκτη: και τα δύο υλικά διαπερνούν το ένα το άλλο, έτσι ώστε η διεπαφή μεταξύ τους δεν είναι πλέον επίπεδη, αλλά είναι χωρικά κατανεμημένη. Υλοποιείται είτε με περιστροφική επίστρωση ενός μίγματος πολυμερών φουλλερενίων, είτε με συν-εξάτμιση των συζευγμένων μορίων.



Σχήμα 3.4 Διαδικασίες παραγωγής και ανασυνδυασμού σε άτακτες οργανικές ηλιακές κυψέλες

¹¹ Είναι μια διαδικασία θέρμανσης και αργής ψύξης, ώστε να σκληρύνει και να μειωθεί η ευθραυστότητα του υλικού επεξεργασίας.

¹² Ένας αδιάτακτος οργανικός ημιαγωγός, είναι ένα υλικό το οποίο δεν είναι εντελώς κρυσταλλικό, έχοντας μόνο μικρή εμβέλεια "τάξη" στη δομή του.

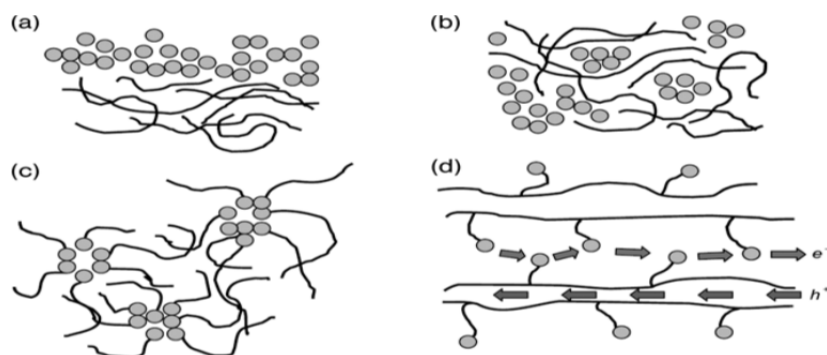
Οι μαζικές ετεροδομές έχουν το πλεονέκτημα να είναι σε θέση να διαχωρίσουν εξιτόνια πολύ αποτελεσματικά σε όλο το εύρος της ηλιακής κυψέλης, και έτσι μπορούν να δημιουργήσουν ζεύγη πόλων σε οποιοδήποτε σημείο του Φιλμ. Το μειονέκτημα είναι, ότι είναι κάπως πιο δύσκολο να ξεχωρίσει αυτά τα ζεύγη πόλων λόγω της αυξημένης αταξίας. Επίσης, είναι πιο πιθανό ότι παγιδευμένοι φορείς φορτίου θα ανασυνδυαστούν με το κινητούς φορείς.

Οι πιο σημαντικές διαδικασίες παραγωγής και ανασυνδυασμού σε αδιάτακτες οργανικές ηλιακές κυψέλες BHJ φαίνονται στο Σχήμα 3.4. Στην γραμμική ετεροδομή, μόνο η γεωμετρική διεπαφή μεταξύ των συζευγμένων στρωμάτων πολυμερών και φουλλερενίων είναι η περιοχή όπου αλληλεπιδρούν τα υλικά δότη δέκτη, αλλά στην μαζική ετεροδομή, εμπλέκεται το σύνθετο στρώμα, σε όλο τον όγκο του. Για το λόγο αυτό μια τέτοια διάταξη είναι ελκυστική, δίνοντας ρεύματα βραχυκυκλώσεως υψηλότερης τάξης μεγέθους από τις προηγούμενες συσκευές που περιγράψαμε.

Τα εξιτόνια είναι φωτοπαραχθέντα, διαχέονται στην επαφή δότη-δέκτη και αποσυνδέονται σε (a) ζεύγη πόλων ή (b) ανασυνδέονται με ακτινοβολία (ακτινοβόλος επανασύνδεση). Εάν δημιουργούνται ζεύγη πόλων, τότε μπορούν επίσης να διαχωριστούν με τη βοήθεια ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Τα ελεύθερα πόλων μπορούν στη συνέχεια να «πηδήξουν» στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια για να δημιουργήσουν ένα φωτορεύμα (a) ή να ανασυνδυαστούν με άλλα κινητά ή παγιδευμένα φορτία (c).

3.2 Ηλιακές Κυψέλες Μαζικής Ετεροδομής

Γενικά, η μαζική ετεροδομή εξασφαλίζει περιοχή μεγάλης διεπαφής και ως εκ τούτου βέλτιστη επαφή δότη-δέκτη. Αυτό γίνεται συνήθως με γρήγορη εξάτμιση διαλύτη, εμποδίζοντας έτσι τις συνθήκες ισορροπίας που ευνοούν τον διαχωρισμό φάσης. Τέσσερις σημαντικές λειτουργίες (Διάγραμμα 3.5) για την υλοποίηση της ετεροδομής έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα: (a) δύο στρωμάτων, (b) μαζικής, (c) μοριακής, (d) «διπλοκαλωδιωμένων» πολυμερών.

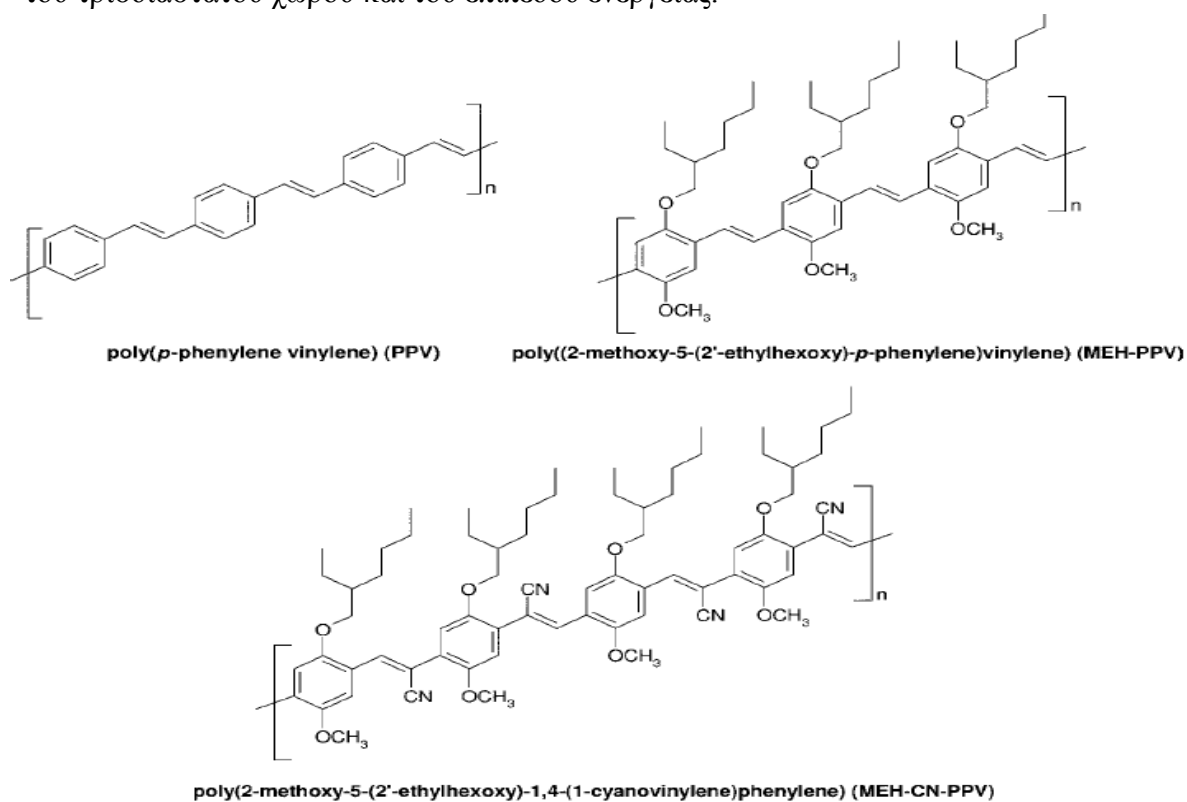


Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση διαφορετικών μορφολογιών ετεροδομής (a) δύο στρωμάτων, (b) μαζικής, (c) μοριακής, (d) «διπλοκαλωδιωμένων» πολυμερών

Τα περισσότερα συζευγμένα πολυμερή στην μη νοθευμένη κατάστασή τους είναι δότες ηλεκτρονίων όταν φωτοδιεγείρονται. Επιπλέον, η χρήση τους ως εργαλεία Φ/Β προέρχεται από τη σταθερότητα των πόλων, που δημιουργούνται από φωτεινή ακτινοβολία, σε αυτό το είδος του κορμού του πολυμερούς.

Τα συζευγμένα πολυμερή που είναι διαλυτά σε κοινούς διαλύτες είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για την παραγωγή μεγάλου εμβαδού Φ/Β κυψελών γιατί οι τεχνικές υγρής εκτύπωσης μπορούν να εφαρμοστούν στην παραγωγή λεπτών φιλμ που είναι κατασκευασμένα από τέτοια πολυμερή, με την χρήση μειωμένης ποσότητας ακριβών φωτοδραστικών υλικών. Τέτοια πολυμερή είναι: πολύ(π-φαινυλένιο βινυλένιο) (PPV, Εικόνα 3.6) και πολυ(αλκυλ-θειοφαίνιο) (PATs), πολυ(3-εξυλοθειοφαίνιο) (P3HT), πολυ[2-μέθοξυ-5-(2'-αιθυλοξοξυ)-1,4-φαινυλένιο βινυλένιο] (MEH-PPV), και πολυ[2-μεθοξυ-5-(3',7'-διμεθυλοκυκλοξυ)-π-φαινυλένιο βινυλένιο] (OC1C10-PPV).

Οι μοριακής ετεροδομής κυψέλες ανήκουν σε συστήματα υλικών με την υψηλότερη PCE. Η τεχνολογία της μαζικής ετεροδομής BHJ βασίζεται σε μείγματα πολυμερών δοτών και υψηλής διαλυτότητας παραγωγών φουλλερενίων-δεκτών. Η εταιρία Konarka Technologies, για παράδειγμα, έφτασε το 5,21% αποτελεσματικότητας σε πλαστικές ηλιακές κυψέλες με ενεργή περιοχή 1.024 cm², που δείχνει τις δυνατότητες της τεχνολογίας. Τέλος, τα συζευγμένα μπλοκ συμπολυμερών δείχνουν καλές δυνατότητες για περαιτέρω βελτιώσεις λόγω της μειωμένης απώλειας εξιτονίου, φωτονίου και φορέα, μέσω των βελτιστοποιήσεων του τρισδιάστατου χώρου και του επιπέδου ενέργειας.



Σχήμα 3.6 Χημικές δομές ορισμένων αντιπροσωπευτικών συζευγμένων πολυμερών.

3.3 Βελτιστοποίηση Οργανικών Ηλιακών Κυψελών

Μετά την ανακάλυψη των κυψελών BHJ, έχει αναπτυχθεί με επιτυχία μια σειρά από μεθόδους βελτιστοποίησης. Η επιλογή του διαλύτη καθώς και η ανόπτηση ηλιακών κυψελών πολυμερών-φουλλερενίου επεξεργασμένων με χημικό διάλυμα, οδηγούν σε μια πιο ευνοϊκή εσωτερική δομή σε σχέση με την αποσύνδεση ζεύγους πόλαρον και τη μεταφορά φορτίου. Έτσι, η αποδοτικότητα της μετατροπής ενέργειας αυξήθηκε πολλαπλάσια, στην περίπτωση της ανόπτησης από 0,5% σε πάνω από 3%. Σαφώς, η βελτιστοποίηση από καινοτόμες διαδρομές είναι μια συνεχής διαδικασία και πρόσφατα ηλιακές κυψέλες πολύ-θειοφαινιούχων-φουλλερενίων επεξεργασμένες με διάλυμα έδωσαν PCE 5,8%. Αυτές οι κυψέλες κάνουν χρήση των πολυμερών χαμηλού ενεργειακού κενού (E_g) επεξεργασμένων με αλκάνιο διθειόλης.

Σε γενικές γραμμές, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση ενεργειακής μετατροπής των οργανικών ηλιακών κυψελών, θα πρέπει να συντεθούν καινοτόμα υλικά δότη-δέκτη. Δύο κύριες ιδιότητες θα πρέπει να είναι στο στόχαστρο:

- η ικανότητα να αυτοοργανώνονται (ενίσχυση της τάξης και κατά συνέπεια της μεταφοράς φορτίου)
- ένα φάσμα απορρόφησης όσο το δυνατόν ευρύτερο.

Ένας δέκτης απορρόφησης έχει μεγάλη προοπτική για την αύξηση του φωτορεύματος καθώς, στις περισσότερες περιπτώσεις, μόνο το υλικό του δότη απορροφά το φως αποτελεσματικά. Επιπλέον, με μεταβολή του σχετικού ενεργειακού επιπέδου των υλικών του δότη και του δέκτη, η απώλεια ενέργειας λόγω της μεταφοράς ηλεκτρονίων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Για ανόργανες ηλιακές κυψέλες, ο λεπτομερής υπολογισμός *ισορροπίας του Shockley και Queisser*¹³, η απόδοση μετατροπής ισχύος σε σχέση με το ενεργειακό χάσμα (E_g), εμφανίζεται ως μια μαύρη συμπαγής γραμμή στο σχήμα 3.7.

Για οργανικές ηλιακές κυψέλες, από την άλλη πλευρά, δεν υπάρχει πλήρης αναλυτική θεωρία για να περιγράψει όλες τις παραμέτρους ανάλογα με τις ιδιότητες. Μια πρόσφατη εκτίμηση στηριζόμενη στις ακόλουθες (λογικές) υποθέσεις, ωστόσο, δείχνει τις δυνατότητες των πλαστικών ηλιακών κυψελών:

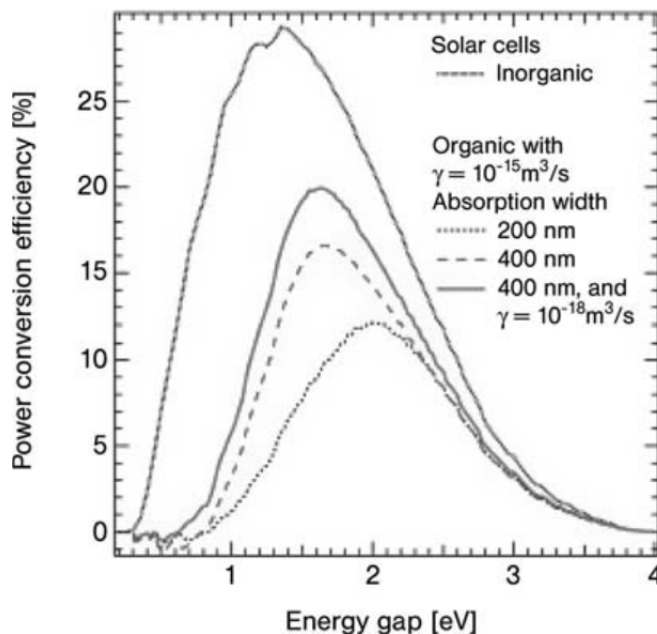
- *κβαντική απόδοση*¹⁴ 100% (μέσα στην ζώνη απορρόφησης των 200nm (μπλε) και 400nm (κόκκινο))

¹³ Το όριο Shockley-Queisser ή λεπτομερές όριο ισορροπίας αναφέρεται στη μέγιστη θεωρητική αποδοτικότητα των ηλιακών κυψελών χρησιμοποιώντας μια επαφή τύπου p-n για τη συλλογή ενέργειας από την κυψέλη. Το όριο αυτό υπολογίστηκε πρώτα από τον William Shockley και Hans Queisser το 1961.

¹⁴ Κβαντική απόδοση καλείται ο μέσος αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται φωτοηλεκτρικά από μία φωτοκάθοδο ανά προσπίπτον φωτόνιο συγκεκριμένου μήκους κύματος σε έναν σωλήνα φωτοεκπομπής.

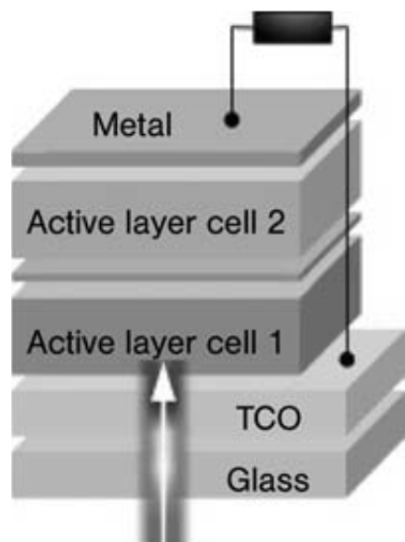
- συντελεστής πλήρωσης¹⁵ 80%
- πάχος 200nm
- τάση ανοικτού κυκλώματος με δύναμη ανασυνδυασμού, γ , είτε $10^{-15} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ είτε $10^{-18} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- E_g έχει οριστεί σε ενεργειακό κενό μείον την ενέργεια σύνδεσης του εξιτονίου E_b της τάξης των 0.3 eV.

Η μέγιστη μετατροπή ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί είναι σαφώς χαμηλότερη από ότι για ανόργανες ηλιακές κυψέλες πυριτίου. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση μετατροπής ισχύος θα πρέπει να συντεθούν νέα υλικά δότη-δέκτη, με ευρύτερα φάσματα απορρόφησης. Ωστόσο, άτακτες οργανικές ηλιακές κυψέλες έχουν πολλές δυνατότητες ενόψει της κατασκευής τους με την εκτύπωση



Σχήμα 3.7 Απόδοση μετατροπής ισχύος για το πυρίτιο και οργανικές ηλιακές κυψέλες με ζώνη απορρόφησης των 200nm ή 400nm. (Εικόνα <http://blog.disorderedmatter.eu>).

¹⁵ Συντελεστής πλήρωσης είναι ο λόγος της μέγιστης αποκτηθείσας ισχύος της μονάδας του ανοικτού κυκλώματος τάσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 3.8 Σειριακή οργανική ηλιακή κυψέλη. (Εικόνα <http://blog.disorderedmatter.eu>).

“R2R” (βλ. παρακάτω), με χαμηλό κόστος, ευκαμψία και μικρό βάρος.

Υψηλότερη ενδογενής απορρόφηση δεν είναι ο μόνος δρόμος για υψηλότερες αποδόσεις οργανικών φωτοβολταϊκών. Μια άλλη δυνατότητα για να καλυφθεί μια ευρύτερη κλίμακα του ηλιακού φάσματος, συμπεριλαμβανομένων τόσο των ορατών υπεριωδών (UV) και των υπέρυθρων (IR), είναι ηλιακές κυψέλες με πολυεπαφές επεξεργασμένες με διάλυμα οι οποίες συνδυάζουν διαφορετικές κλίμακες απορρόφησης των ήδη υπαρχόντων υλικών.

Ένα παράδειγμα είναι η διαδοχική ηλιακή κυψέλη, από τη σύνδεση σε σειρά δύο υποκυψελών με συμπληρωματικές κλίμακες απορρόφησης (Σχήμα 3.8). Και οι δύο υποκυψέλες παράγουν το δικό τους φωτορεύμα απορροφώντας το φως και παράγοντας φορτία, και έχουν τη δική τους τάση ανοικτού κυκλώματος.

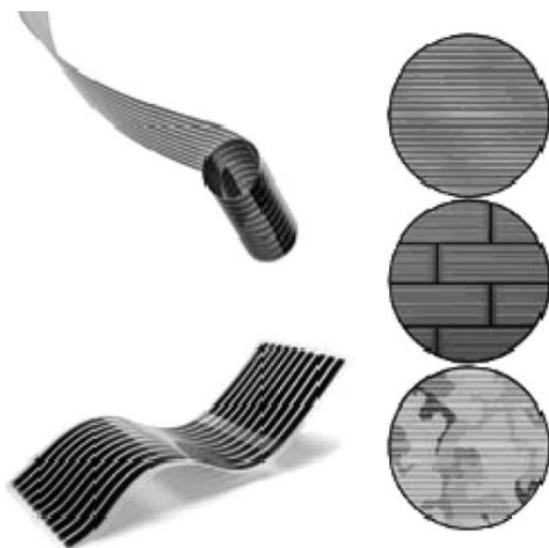
Οι δύο κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά αλληλοεπηρεάζονται. Οι φωτοπαραχθέντες οπές της κυψέλης 1 εξάγονται από το ενδιάμεσο στρώμα ανασυνδυασμού ITO, και ανασυνδυάζονται με φωτοπαραχθείσες οπές από την κυψέλη 2. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι περίπου ίση με το άθροισμα της τάσης ανοικτού κυκλώματος της κάθε κυψέλης. Έτσι, περίπου, σε διαδοχική ηλιακή κυψέλη με υποκυψέλες 1 και 2 ισχύει:

- Τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{OC} = V_{OC_1} + V_{OC_2}$
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = \min(I_{SC_1}, I_{SC_2})$

Οι υποκυψέλες είναι κατασκευασμένες από μίγματα πολυμερών φουλλερενίων. Η άνοδος είναι το ITO (Indium Tin Oxide – Οξείδιο Ινδίου Κασσίτερου) σε ένα γυάλινο υπόστρωμα. Η άνω κυψέλη είναι PCPDTBT-PC60BM, το στρώμα ανασυνδυασμού γίνεται από TiOx και μια ειδική PEDOT-PSS, και η κάτω κυψέλη είναι P3HT-PC70M. Η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από TiOx και αλουμίνιο. Με τη ρύθμιση του πάχους των δύο υποκυψελών, επιτυγχάνουμε υψηλό αποτέλεσμα φωτορεύματος.

3.4 Τυπωμένες Πλαστικές Ηλιακές Κυψέλες

Αφού αναπτυχθούν, αποδοτικές και σταθερών πολυμερών ηλιακές κυψέλες θα βρουν γρήγορα διαδεδομένη εφαρμογή. Πράγματι, σε σύγκριση με ηλιακές κυψέλες πυριτίου, αποδοτικές ηλιακές κυψέλες οργανικών



Σχήμα 3.9 Ρολά εμπορικής κατηγορίας τυπωμένων ηλιακών φωτοβολταϊκών με εκτυπωτή τεχνολογίας inkjet. (Εικόνα: Konarka Technologies Inc.)

ημιαγωγών θα είναι λιγότερο ακριβές και ευκολότερες στην κατασκευή, ενώ όντας ελαφρύτερες και εύκαμπτες θα μπορούν γρήγορα να ενσωματωθούν σε υφιστάμενα ακίνητα.

Μοριακής ετεροδομής κυψέλες μπορούν να είναι αποτελεσματικά εκτυπωμένες με χρήση τεχνολογίας εκτύπωσης με ψεκασμό (**inkjet**), ανοίγοντας το δρόμο για μεγάλης κλίμακας παραγωγή οργανικών ηλιακών κυψελών.

Τον Μάρτιο του 2008, η Konarka Technologies διεξήγαγαν με επιτυχία την πρώτη επίδειξη κατασκευής ηλιακών κυψελών με υψηλής απόδοσης εκτύπωση inkjet. Η επίδειξη (Σχήμα 3.9) επιβεβαιώνει ότι οργανικές ηλιακές κυψέλες μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία με τεχνολογίες εκτύπωσης με ελάχιστη ή καμία απώλεια σε σύγκριση με ημιαγωγούς τεχνολογίας “clean room” («καθαρού θαλάμου»), όπως η περιστροφική επίστρωση, (spin coating).

Όπως και στην περίπτωση τυπωμένων ηλιακών κυψελών CIGS που κατασκευάζονται από την Nanosolar (κεφάλαιο 2), η τεχνολογία συνεχούς εκτύπωσης, “R2R”, παρέχει εύκολη και γρήγορη εναπόθεση των πολυμερών ταινιών σε μεγάλες επιφάνειες. Η διαδικασία είναι σημαντικά λιγότερο ακριβή από την συναρμολόγηση, πολλών σταδίων, των παραδοσιακών ηλιακών κυψελών.

Τέλος, οι συσκευές πολυμερών είναι συμβατές με διάφορα υποστρώματα και δεν χρειάζονται επιπλέον σχεδιασμό, ενώ η τεχνολογία εκτύπωσης inkjet επιτρέπει

την κατασκευή των ηλιακών κυψελών με πολλά χρώματα και μοτίβα για τα προϊόντα χαμηλότερης απαιτητής ισχύος, όπως εφαρμογές αισθητηρίων.

Οι μορφολογικές και διεπαφικές ιδιότητες των τυπωμένων με τεχνολογία inkjet φωτοδραστικών στρωμάτων μείγματος πολυμερών φουλλερενίων καθορίζονται από έναν κατάλληλης σύνθεσης διαλύτη. Πιο αναλυτικά, ένα μείγμα υψηλού και χαμηλού βρασμού διαλυτών, (68% ορθοδιχλωροβενζόλιο και 32% 1,3,5-τριμεθυλοβενζόλιο), επιτρέπει την παραγωγή εκτυπωμένων, με τεχνολογία inkjet, οργανικών ηλιακών κυψελών με απόδοση μετατροπής ισχύος της τάξης του 3%.

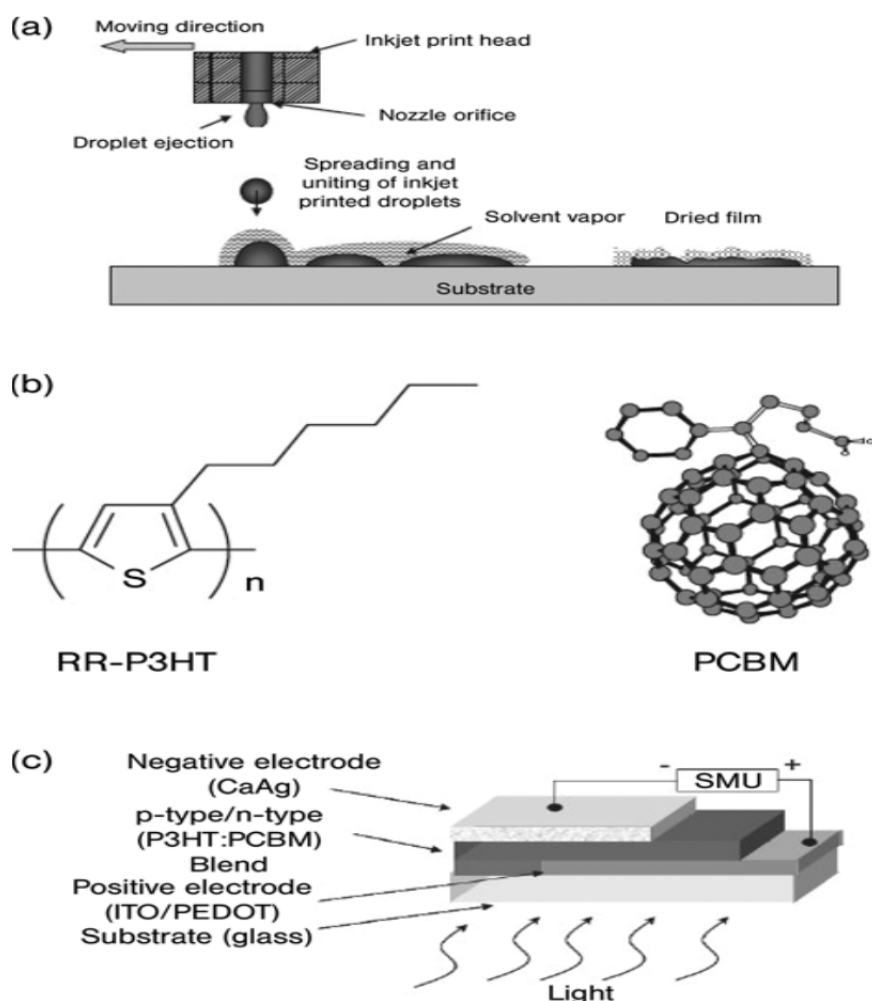
Το σχήμα 3.10α δείχνει μια σχηματική παράσταση του σχηματισμού οργανικών φιλμ με εκτύπωση inkjet. Η εξάπλωση του υγρού στο υπόστρωμα και η συμπεριφορά ξήρανσης του τυπωμένου φιλμ ελέγχονται από την σύνθεση του διαλύτη και τη θερμοκρασία της επιφάνειας εκτύπωσης. Κατά τη διαδικασία ξήρανσης και της επακόλουθης ανόπτησης, το προτεινόμενο διαλυτικό μίγμα, (1,2-διχλωροβενζόλιο – μεσιτυλένιο), οδηγεί σε ένα δίκτυο βέλτιστου διαχωρισμού των φάσεων του δότη πολυμερών και δέκτη φουλλερενίων και ως εκ τούτου βελτιώνει σημαντικά την απόδοση.

Σε αυτή την περίπτωση, το φωτοδραστικό στρώμα αποτελείται από RR-P3HT αναμειγμένο με PCBM και διαλύονται σε ένα μείγμα διαλυτών oDCB-mesitylene. Η θερμοκρασία πλάκας εκτύπωσης inkjet στους 40°C, σε ένα ομοιόμορφο Φιλμ, προσδίδει αξιόπιστη εκτύπωση σε σχέση με τη διάχυση και την διαμόρφωση του Φιλμ.

Ο συνδυασμός του μείγματος διαλυτών oDCB-mesitylene, ένα διαλυτικό μίγμα με υψηλότερο / χαμηλότερο σημείο βρασμού, εξυπηρετεί δύο σκοπούς: (i) το πρώτο στοιχείο του μίγματος διαλυτών (oDCB με Σ.Β.= 180°C) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόληψη της απόφραξης των ακροφυσίων και να προσφέρει μια αξιόπιστη εκτόξευση του από την κεφαλή εκτύπωσης, (ii) το δεύτερο συστατικό (μεσιτυλένιο) του μίγματος διαλυτών, με χαμηλότερη επιφανειακή τάση, χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η βέλτιστη ύγρανση και διάχυση του διαλύματος στο υπόστρωμα. Επιπλέον, το μεσιτυλένιο έχει υψηλότερη πίεση ατμών, 1,86 mmHg στους 20°C και με χαμηλότερο σημείο βρασμού από 165°C σε σύγκριση με το oDCB και το τετραλένιο. Ως εκ τούτου, αυξάνει την ταχύτητα ξήρανσης του μείγματος διαλυτών, το οποίο είναι μια κρίσιμη παράμετρος για την μορφολογία. Για μια αποδοτική ηλιακή κυψέλη μαζικής ετεροδομής BHJ, είναι απαραίτητος ο καλός έλεγχος της μορφολογίας.

Η μορφολογία που προκύπτει εξαρτάται από το εργαλείο κατασκευής που επιλέχθηκε για την εναπόθεση του ενεργού στρώματος. Η AFM, (Atomic Force Microscopy – Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης), εικόνα φιλμ, με εκτύπωση inkjet μείγματος P3HT-PCBM με χρήση είτε τετραλενίου (Σχήμα 4.11a) ή το μίγμα του oDCB και μεσιτυλενίου (Σχήμα 4.11b) δείχνουν πράγματι σημαντική διάκριση στο μέγεθος του κόκκου και στην τραχύτητα επιφάνειας μεταξύ των έντυπων στρωμάτων. Το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου του εκτυπωμένου στρώματος P3HT-PCBM για τη διαμόρφωση τετραλενίου δείχνει μορφολογικούς περιορισμούς, λόγω της μικρής

ταχύτητας ξήρανσης που οδηγεί στον διαχωρισμό του πολυμερούς και του φουλλερενίου στο εκτυπωμένο μείγμα.



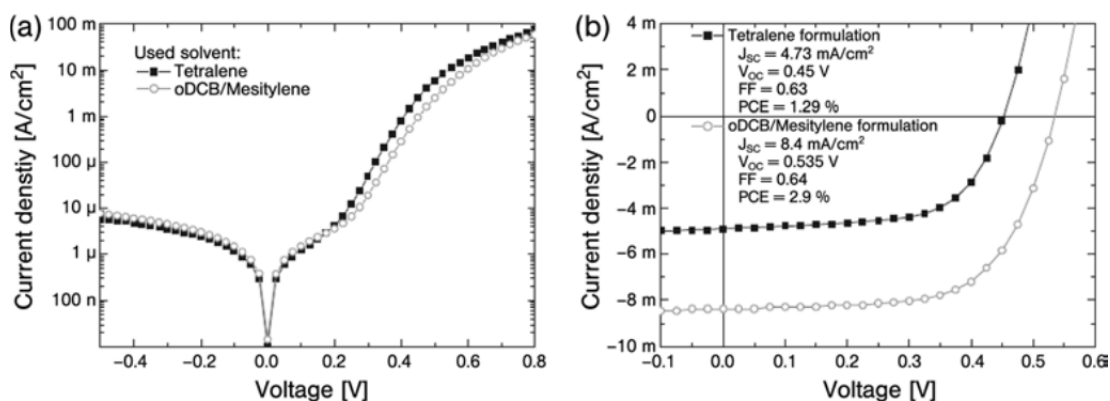
Σχήμα 3.10 (a) Σχηματική παράσταση των εκτυπωμένων οργανικών φιλμ με τεχνολογία inkjet. (b) χημική δομή του πολυμερούς δότη RR-P3HT και του δέκτη PCBM που χρησιμοποιούνται για να την εκτύπωση φωτοδραστικών στρωμάτων. (c) Η δομή της συσκευής ηλιακής κυψέλης: γυαλί / ITO / PEDOT: PSS/P3HT:PCBM / CaAg .

Η διαμόρφωση τετραλενίου εμφανίζει σημαντικά τραχιές επιφάνειες για την ενεργή περιοχή inkjet εκτύπωσης (μέση τραχύτητα 21 nm), ενώ η μέση τραχύτητα για το ενεργό στρώμα inkjet εκτύπωσης μίγματος oDCB-mesitylene είναι μόλις 2,6 nm. Και πάλι, η μη ομοιόμορφη τραχύτητα επιφάνειας επηρεάζει τις περιοχές διασύνδεσης του φωτοδραστικού στρώματος και ως εκ τούτου τις επιδόσεις της inkjet εκτυπωμένης συσκευής.

Αντίθετα, οι συσκευές με inkjet εκτύπωση ενεργής επιφάνειας με βάση το διαμορφωμένο διαλυτικό μίγμα oDCB- μεσιτυλένιο, έχουν σημαντικά υψηλότερη τιμή J_{sc} της τάξης του 8.4 mAcm^{-2} , V_{oc} της τάξης των 0,54 V και ένα FF της τάξης του 64%, παράγοντας τελικά μια συνολική PCE του 2,9%. Οι ενισχυμένες αυτές τιμές συνδέονται άμεσα με την βελτίωση της μορφολογίας και την ομαλότερη τραχύτητα του προφίλ επιφάνειας (Σχήμα 3.12).

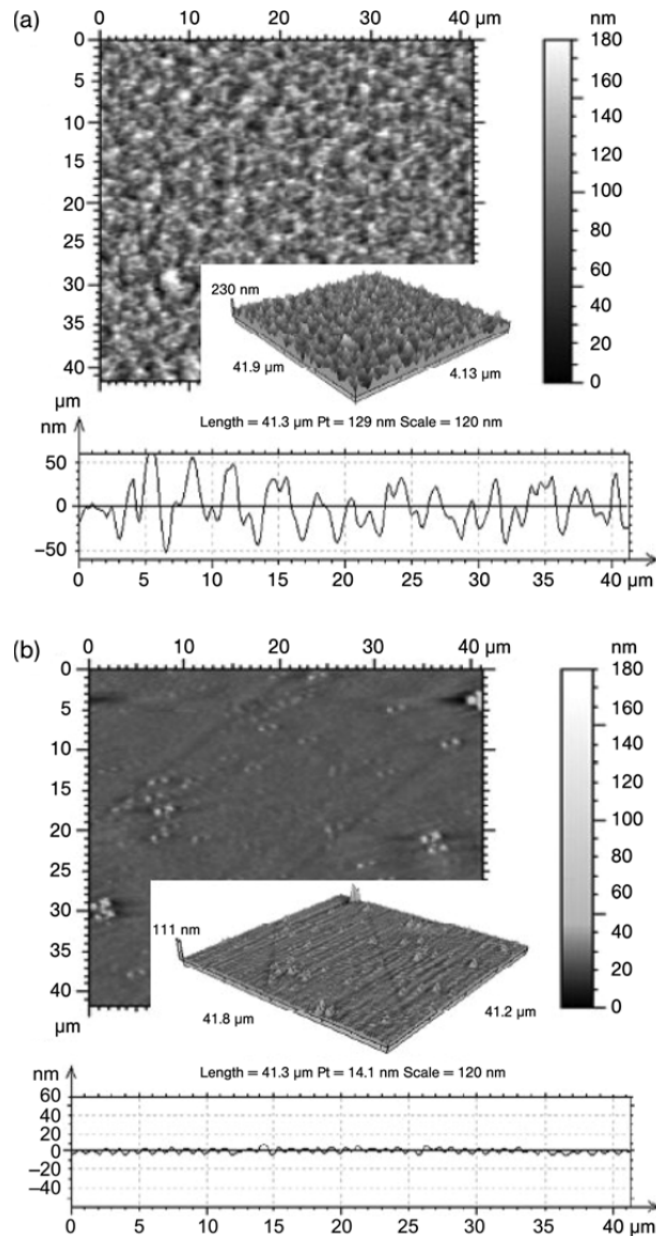
Τα ημιαγώγιμα συζευγμένα πολυμερή που αποτελούν τα φωτοευαίσθητα στρώματα των κυψελών δημιουργούνται σε παρτίδες αρκετών λίτρων το καθένα. Η τελική τους μορφή είναι μια αφράτη σκόνη. Όταν οι κατασκευαστές είναι έτοιμοι να χρησιμοποιήσουν το υλικό, που συνδυάζεται με στάνταρ βιομηχανικούς διαλύτες, κοινούς στην εκτύπωση, για να δημιουργήσουν ένα μελάνι ή ένα υγρό επικάλυψης. Τα ημιαγώγιμα πολυμερή εφαρμόζονται έτσι μέσω inkjet εκτύπωσης.

Η γραμμή παραγωγής “R2R” (Σχήμα 3.13) περιλαμβάνει πέντε στάδια. Κάθε στάδιο αντιστοιχεί σε ένα στρώμα των ηλιακών κυψελών. Η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία επικάλυψης είναι ανάλογη με εκείνη της επίπεδης μήτρας (σχηματισμός πλαστικού με εξώθηση) ή του ολισθαίνοντος επιστρωτήρα. Η πρώτη στρώση που πάει πάνω στο υπόστρωμα είναι ένα ημιδιαφανές ηλεκτρόδιο, συνήθως ένα αγωγίμο διαφανές στρώμα οξειδίου. Επόμενο είναι ένα στάδιο σχεδιασμού που διαχωρίζει



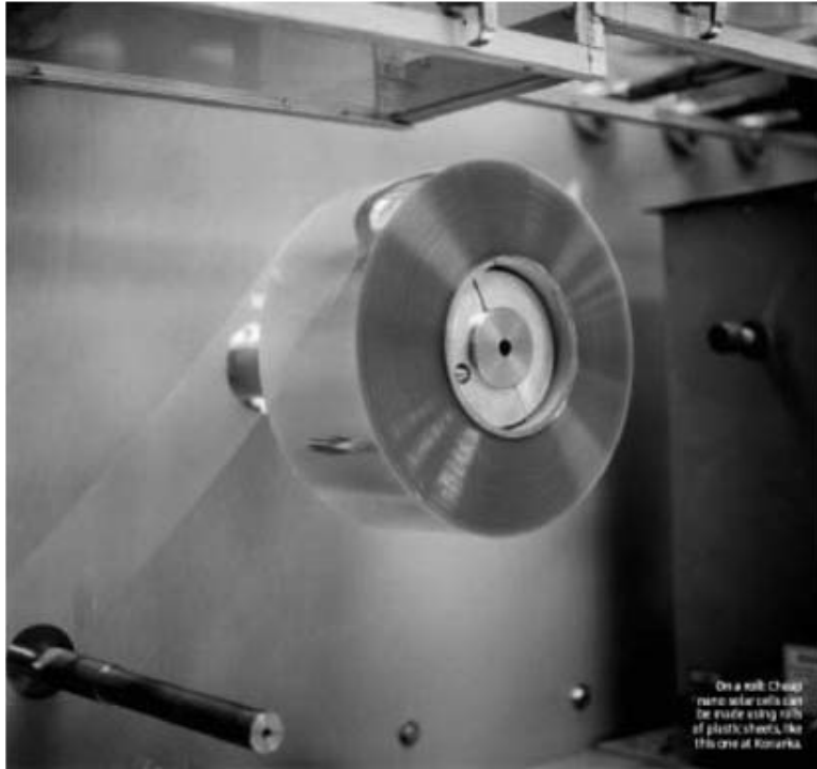
Σχήμα 3.12 J-V καμπύλες για τις inkjet εκτυπωμένες ηλιακές κυψέλες επεξεργασμένες με χρήση διαλύτη tetralene (συμπαγή τετράγωνα) και oDCB-mesitylene (κύκλοι). (a) Στο σκοτάδι σε μια ημι-λογαριθμική απεικόνιση. (b) Υπό το φως σε μια γραμμική απεικόνιση.

τις κυψέλες μεταξύ τους, ώστε να μπορούν αργότερα να συνδεθούν σε σειρά. Στη συνέχεια εναποτίθενται τα ενεργά στρώματα, ακολουθούμενα από ένα ηλεκτρόδιο από πάνω για να ολοκληρωθεί η ενεργή στοιβία. Οι ολοκληρωμένες κυψέλες αποκόπτονται και πλαστικοποιούνται.



Σχήμα 3.11 AFM εικόνα P3HT-PCBM μείγμα διαλύματος. (a) tetralene διαμόρφωση. (b) οDCB-mesitylene διαμόρφωση με εκτύπωση inkjet.

Όλα αυτά τα στρώματα είναι εξαιρετικά λεπτά. Το στρώμα βάσης TCO, για παράδειγμα, είναι περίπου 100nm πάχους. Μερικά από τα ενεργά στρώματα των ημιαγωγικών πολυμερών είναι μόνο μερικές δεκάδες νανόμετρα. Τέτοια ρηγά στρώματα στεγνώνουν γρήγορα και έτσι προωθείται η χρήση υψηλών ταχυτήτων δικτύου.



Εικόνα 3.13 Γραμμή παραγωγής πλαστικών ηλιακών κυψελών, όπου οι ηλιακές κυψέλες εκτυπώνονται σαν εφημερίδες, “R2R”.

Το κλειδί για να καταστεί πρακτική η διαδικασία είναι η ποιότητα της διαδικασίας εφαρμογής. Τρυπούλες (pinholes) στο εφαρμοσμένο υλικό, για παράδειγμα, δημιουργούν βραχυκυκλώματα μεταξύ των στρωμάτων. Έτσι οι κατασκευάστριες εταιρίες έχουν βελτιστορυθμίσει τις μεθοδολογίες εκτύπωσης για να διασφαλίσουν ώστε τα κρίσιμα μεσαία στρώματα να μην περιέχουν τρυπούλες.

Άλλο ένα στρατηγικό βήμα για την κατασκευή αποτελεί η θέρμανση που δημιουργεί «νησιά» κρυστάλλων μέσα σε ένα άλλως άμορφο πολυμερές. Αυτή η διαδικασία ανόπτησης (αποσκλήρυνση με πυράκτωση), για να πάρει τη σωστή νανοδομή, πραγματοποιείται περίπου στους 110°C και διαρκεί μόνο μερικά δευτερόλεπτα.

Η καθαριότητα κατά τη διάρκεια της απόθεσης είναι σημαντική, αλλά όχι «κλείνοντας» το σύνολο της γραμμής παραγωγής σε ένα καθαρό χώρο, για να κρατήσει έξω τη σκόνη. Έτσι «σφραγίζονται» μόνο οι σταθμοί επίστρωσης. Αυτό επιτρέπει στο σύνολο της γραμμής παραγωγής να βρίσκεται σε ένα συνηθισμένο εργοταξικό περιβάλλον.

3.5 Βαφή Πλαστικών Ηλιακών Κυψελών Με Πινέλο

Το σχήμα 3.14 δείχνει σχηματικά την παραγωγή βαψίματος με πινέλο. Οι επακόλουθες I-V καμπύλες για δύο BHJ ηλιακές κυψέλες, που προήλθαν από βάψιμο με πινέλο ή με παραδοσιακή περιστροφική επίστρωση των πολυμερών. Σαφώς, η

διαδικασία πινέλο-βαφή βελτιώνει σημαντικά την απόδοση των πλαστικών ηλιακών κυψελών.

Η βαφή με το πινέλο έγινε πάνω σε πολυ(3,4-αιθυλοδουξυθειοφαινυλενιο) (PEDOT): πολυ(σουΛ/Φονικό στυρόλιο) / PSS)-με υπόστρωμα επίστρωσης οξειδίου ινδίου κασσίτερου (Indium Tin Oxide / ITO), σε θερμή πλάκα θερμοκρασίας 50°C. Μια γρήγορη διαδικασία πινέλο-βαφή, με εμποτισμένο πινέλο μίγματος μπορεί να προκαλέσει την ταχεία στερεοποίηση της ενεργής επιφάνειας και επιτρέπει τον κρίσιμο έλεγχο του πάχους. Εδώ, το πάχος της ενεργής επιφάνειας θα μπορούσε να ελεγχθεί ομοιόμορφα και είναι 90 nm.

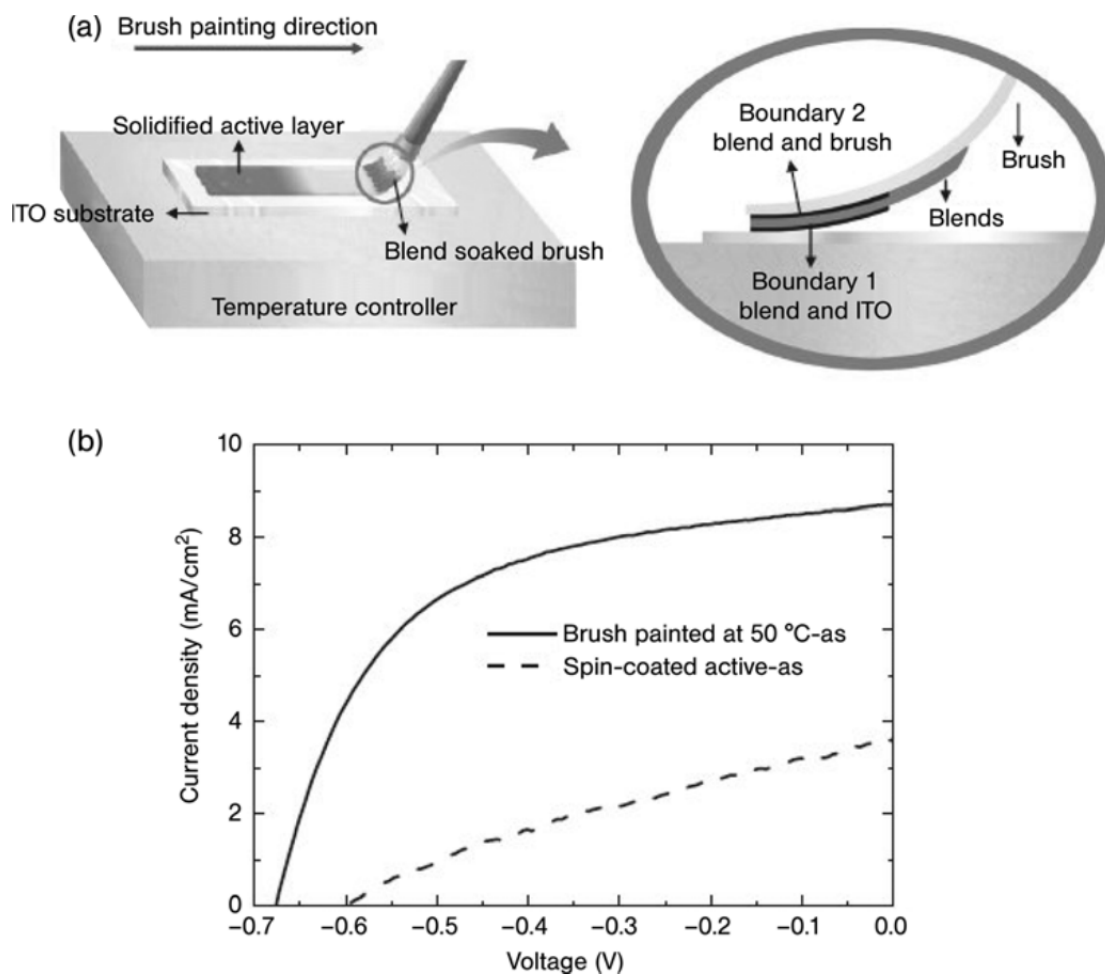
Άλλες μέθοδοι εκτύπωσης, όπως “**doctor blading**” (μέθοδος ρύθμισης της ποσότητας του υγρού υλικού πάνω σε κυλίνδρους) και “**slot extrusion**”, εξώθησης υποδοχής (μέθοδος διέλασης πλαστικού φιλμ στο οποίο το λιωμένο θερμοπλαστικό σύνθετο εξαναγκάζεται να περάσει από μια ευθεία υποδοχή), τα οποία είναι πιο συμβατά με το σύστημα “R2R” από την περιστροφική επίστρωση, παρουσιάζουν συνήθως διαφορές στην απόδοση που προκύπτει από τα μη ομοιόμορφα πάχη.

Στην κατασκευή των ηλιακών κυψελών, ένα ομοιόμορφο πάχος φιλμ είναι ένας σημαντικός παράγοντας λόγω της ισχυρής εξάρτησης της αποδοτικότητας από το πάχος του φιλμ. Χρησιμοποιώντας την τεχνική βαφής με πινέλο, κατέστη δυνατός ο έλεγχος εξαιρετικής αναπαραγωγής και ενιαίου πάχους λόγω του αποτελεσματικού ελέγχου της ανεπιθύμητης ροής των ελεύθερων επιφανειών.

Η βελτιωμένη διάταξη του πολυμερούς, η οποία είναι υπεύθυνη για την ενισχυμένη απόδοση, προκύπτει από την πιο αποτελεσματική εφαρμογή της διατμητικής τάσης στις αλυσίδες πολυμερών, σε όλο το βάθος του διαλύματός τους, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βαφής με πινέλο. Στην περίπτωση του Νευτώνειου τύπου του πολυμερούς διαλύματος, η διατμητική τάση (t), η οποία προκαλεί την οργάνωση των πολυμερών αλυσίδων, είναι ανάλογη με το ιξώδες (ν) και την μεταβολή της ταχύτητας αλλαγής του ιξώδους ($\Delta\nu$) του διαλύματος [$t \approx \nu \cdot \Delta\nu$].

Αντί της ελεύθερης επιφάνειας με μηδενική διατμητική τάση, υπάρχουν δύο επιφάνειες, το υπόστρωμα πολυμερούς διαλύματος-ITO και η περιοχή διασύνδεσης πολυμερούς διαλύματος- βαφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14α. Έτσι, η διαδικασία βαφής μπορεί να δημιουργήσει καλύτερη διάταξη του πολυμερούς σε όλο το βάθος του, σε σύγκριση με την περιστροφική επίστρωση ή την επίστρωση με εμβάπτιση.

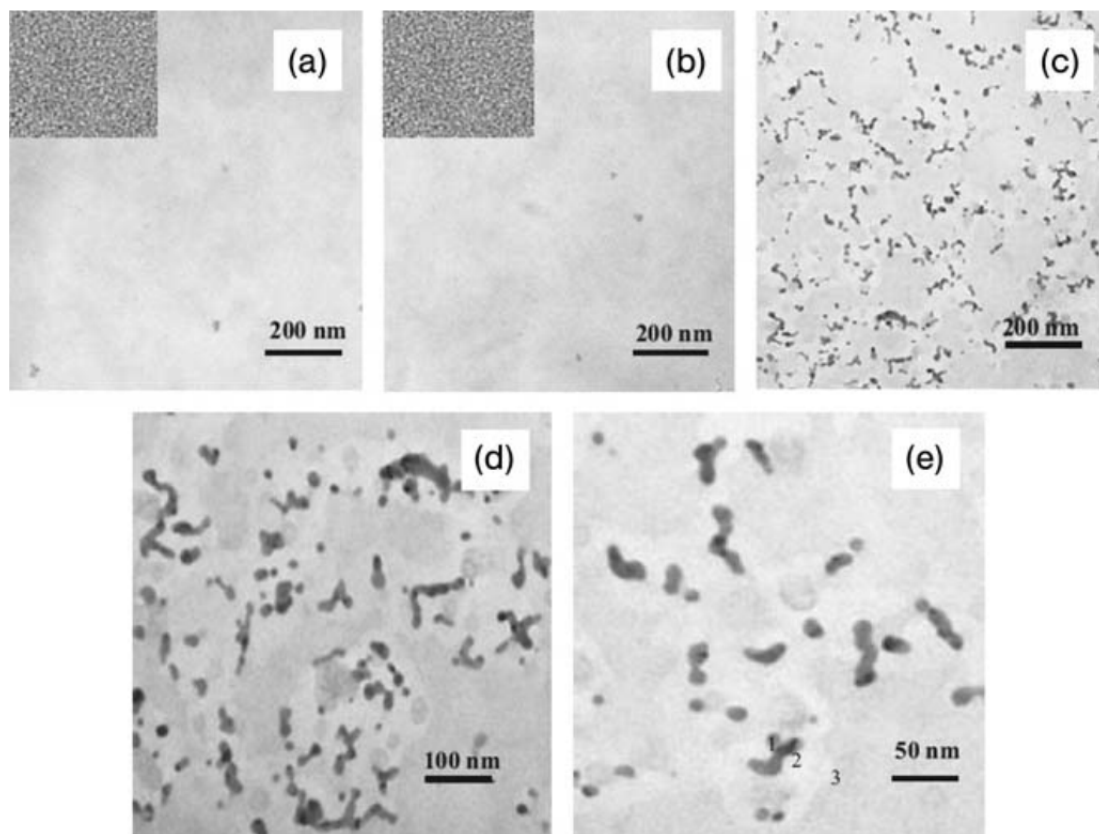
Όταν χρησιμοποιείται η βαφή με πινέλο, αναπτύσσεται μια σταθερή διατμητική τάση ($\Delta\nu = \text{σταθερό}$) σε όλο το βάθος πολυμερούς μίγματος, διότι διατηρείται μια αποτελεσματική επαφή μεταξύ του πινέλου και του μίγματος πολυμερούς. Όταν χρησιμοποιείται περιστροφική επίστρωση ή επίστρωση με εμβάπτιση, η παρουσία μιας ελεύθερης επιφάνειας στην κορυφή (πολυμερές διάλυμα – επαφή με αέρα) προκαλεί μια μηδενική τάση στην κορυφή ($\tau_{\text{επιφάνειας}} = 0, \Delta\nu = 0$). Έτσι, η διατμητική τάση σε όλο το βάθος κατατομής είναι μέγιστη στο κάτω μέρος (υπόστρωμα-περιοχή επαφής πολυμερούς διαλύματος) και μειώνεται γραμμικά κατά μήκος του ύψους, όπου γίνεται μηδέν στην κορυφή.



Εικόνα 3.14 (a) Σχηματική διαδικασία βαφής με πινέλο. (b) Καμπύλες I-V των ηλιακών κυψελών που κατασκευάζονται με περιστροφική επίστρωση (διακεκομμένη γραμμή) και βαφή με πινέλο (συνεχής γραμμή) στους 50°C χωρίς καμία προ-ή μετά επεξεργασία.

Η μορφολογία της ενεργής επιφάνειας, έχει μια κρίσιμη επίδραση στον διαχωρισμό και την μεταφορά φορτίων εντός του δικτύου δότη-δέκτη. Μια παρόμοια μορφολογία που αποτελείται από ομοιόμορφα αλληλοδιαπερούμενα δίκτυα δότην-δεκτών σε νανοκλίμακα παρατηρήθηκε σε εικόνες με χρήση «Μικροσκοπίου Διέλευσης Ηλεκτρονίων» (Transmission Electron Microscopes, TEM) σε ενεργά στρώματα και περιστροφικής επίστρωσης και βαφής με πινέλο στους 50°C, όπως φαίνεται στο ένθετο του σχήματος 3.15a και b.

Σε αντίθεση με τις εικόνες TEM στρώματος με περιστροφική επίστρωση και βαφής με πινέλο στους 50°C, παρατηρήθηκε σοβαρή συσσώρευση στις εικόνες TEM στρώματος βαφής με πινέλο στους 130°C στρώμα (Σχήμα 3.15c).



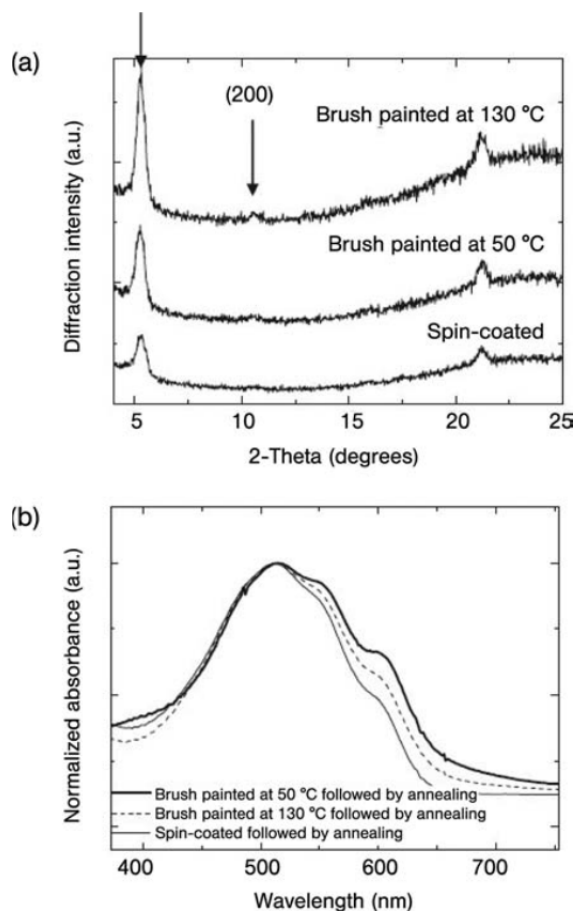
Σχήμα 3.15 TEM εικόνες (a) ενεργό στρώμα περιστροφικής επίστρωσης, (b) ενεργό στρώμα βαφής με πινέλο στους 50°C, και (c) ενεργό στρώμα βαφής με πινέλο στους 130°C. (d-e) διευρυμένες εικόνες TEM ενεργού στρώματος βαφής με πινέλο στους 130°C ακολουθούμενη από ανόπτηση στους 110°C για 7 λεπτά.

Ο χαμηλός συντελεστής πλήρωσης **FF** (Filling Factor) και η χαμηλή αποδοτικότητα μπορεί να αποδοθεί στο σχηματισμό μεγάλων συσσωρεύσεων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βαφής με πινέλο σε υψηλή θερμοκρασία (130 °C), η οποία περιορίζει τον αποτελεσματικό διαχωρισμό φορτίων και την μεταφορά τους. Με άλλα λόγια, αν και μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη διάταξη πολυμερών, όταν η βαφή γίνεται σε υψηλή θερμοκρασία (πιο κοντά στο σημείο βρασμού), δεν έχει βρεθεί σε αυτή τη θερμοκρασία βελτιστοποιημένη μορφολογία ναοκλίμακας για αποδοτικές πλαστικές ηλιακές κυψέλες.

Η διαδικασία βαφής με πινέλο πρέπει να πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες άνω των 50 °C για να δημιουργήσει μια ομαλή και ομοιόμορφη ενεργή επιφάνεια με υψηλό βαθμό διάταξης. Αυτή η προϋπόθεση για τη θερμοκρασία σχετίζεται με το ρυθμό εξάτμισης του χλωροβενζολικού διαλύτη, που πρέπει να είναι αρκετά ταχύς για να παραγάγει καλής ποιότητας φιλμ.

Από την άλλη πλευρά, μετά από θερμική ανόπτηση της ενεργούς επιφάνειας με περιστροφική επίστρωση στους 110 °C για 7 λεπτά, προκύπτει μια βελτιωμένη απόδοση με $V_{OC} = 0,65V$, $I_{SC} = 10,61 mAcm^{-2}$, FF 56,3% και $\eta_e = 3.9\%$ που προέρχεται από μια πιο αποτελεσματική μεταφορά φορτίων λόγω του βελτιωμένου

βαθμού διάταξης (Σχήμα 3.16). Η σχετικά σαφέστερη κορυφή XRD^{16} , περίθλασης ακτίνων X, (X-Ray Diffraction), στο $2\theta \approx 5.3^\circ$ επιβεβαιώνει την αυξημένη κρυσταλλικότητα, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη κινητικότητα των φορτίων



Σχήμα 4.16 (α) XRD φάσματα, διάγραμμα έντασης διάθλασης – γωνία 2θ και (β) UV-vis, ορατή υπεριώδης ακτινοβολία, φωτοενεργής επιφάνειας που κατασκευάστηκε από περιστροφική επίστρωση (γκρι καμπύλη), βαφή με πινέλο στους 50°C (μαύρη καμπύλη) και στους 130°C (διακεκομμένη καμπύλη) ακολουθούμενες, και οι τρεις, από ανόπτηση στους 110°C για 7 λεπτά.

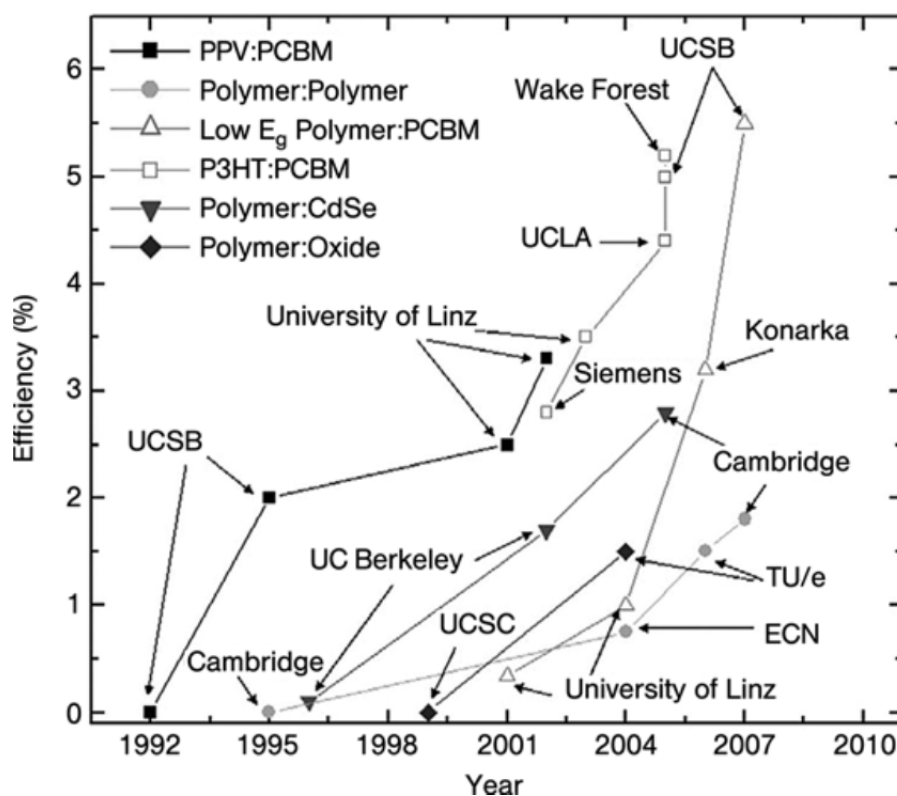
εντός των αλληλοδιαπερούμενων δικτύων και τη μείωση της απώλειας των φορτίων με ανασυνδυασμό.

3.6 Πάουερ Πλάστικ, Ένα Λεπτό, Εύκαμπτο, Οργανικό Ηλιακό Πάνελ

Το σχήμα 3.17 δείχνει την τάση απόδοσης, για την χρονική περίοδο 1992-2007, για πλαστικές ηλιακές κυψέλες. Σε γενικές γραμμές, οι πολυμερείς ηλιακές κυψέλες πλησιάζουν απόδοση μετατροπής ενέργειας $> 5\%$, που όμως εξακολουθεί να

¹⁶ Η διασπορά των ακτίνων X από τα άτομα του κρυστάλλου παράγει σχήμα περίθλασης που μας δίνει πληροφορίες για τη δομή του κρυστάλλου.

αποτελεί το ένα πέμπτο της μέσης απόδοσης (15%) των εμπορικών μονάδων πυριτίου. Κορυφαίες αποδόσεις έχουν παρατηρηθεί σε αδιάτακτες νανοδομημένες ετεροδομές αλλά αναμένονται περαιτέρω κέρδη κατά την βελτιστοποίηση των



Σχήμα 4.17 Οι αναφερόμενες αποδόσεις των διαφόρων τεχνολογιών BHI στην πάροδο του χρόνου. Οι αναφορές με χρονολογική σειρά είναι οι εξής: PPV: PCBM, πολυμερές: πολυμερές, και πολυμερές: CdSe, πολυμερές: οξειδίο, χαμηλό E_g πολυμερές: PCBM, και P3HT: PCBM. Οι συντομογραφίες είναι: Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, Σάντα Μπάρμπαρα (UCSB)/ Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, Σάντα Cruz (UCSC)/ Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, Μπέρκλεϊ (UC Berkeley)/ Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, Λος Άντζελες (UCLA)/ Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Αϊντχόβεν (TU/e)

αρχιτεκτονικών διατεταγμένης νανοδομής.

Οι τρέχουσες προκλήσεις είναι:

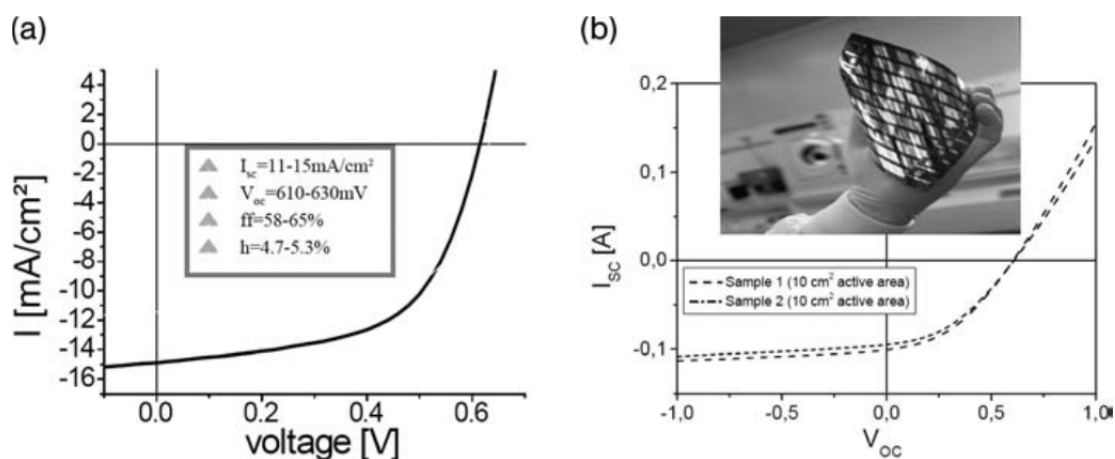
1. Η δημιουργία μιας διατεταγμένης νανοδομής με το κατάλληλο μέγεθος τομέα (<10 nm) και διαστάσεων (300-500nm πάχους).
2. Ανάπτυξη μικρού διάκενου ζώνης πολυμερών με όριο απορρόφησης λιγότερο από το 1 eV, συντελεστή απορρόφησης μεγαλύτερο από 10^5 cm^{-1} , και κινητικότητα φορέα φορτίου υψηλότερη από $10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

3. Την ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας στη διεπαφή δότη-δέκτη ρυθμίζοντας τα ενεργειακά επίπεδα.

Η πρόοδος σε αυτά τα βασικά σημεία είναι αναγκαία για την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων. Οι εμπορικές μονάδες θα πρέπει επίσης να είναι σταθερές στο ηλιακό φως, για τουλάχιστον δέκα χρόνια. Η τρέχουσα απόδοση είναι γύρω στο 5% για τις λωρίδες κυψέλης με επιφάνεια 10 cm^2 (Σχήμα 3.18).

Η υψηλή απόδοση δεν είναι υψίστης σημασίας, διότι οι πελάτες ενδιαφέρονται κυρίως για συνολική ισχύ και χαμηλότερο κόστος.

Στις αρχές του 2006, φορητοί φορτιστές μπαταριών και σκηνές από «Πάουερ Πλάστικ» (“Power Plastic” - εμπορικό σήμα της Konarka Technologies) παραδόθηκαν στο στρατό και την πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ. Ο αμερικανικός στρατός έχει συμβληθεί περαιτέρω με την εταιρεία για να κατασκευάσει μια σειρά από καμουφλαρισμένα ηλεκτροπαραγωγά κτίρια.



Σχήμα 3.18 Η απόδοση της πρώτης εμπορικής ηλιακής κυψέλης από πλαστικό είναι της τάξης του 5% (α) με ενεργή περιοχή μιας μόνο λωρίδας 10 cm^2 , (β) Εικόνα από Konarka Technologies.

Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό των ηλιακών κυψελών από πλαστικό είναι ότι η Konarka μπορεί να προσφέρει εύκαμπτα πλαστικά ηλιακά πάνελ με τυπωμένα σχέδια - όπως διακοσμητικά τούβλα ή καμουφλάζ, τα οποία σαφώς είναι μια απαίτηση για τον στρατό. Γενικότερα, είναι τα μοτίβα, τα χρώματα, και όλα τα αισθητικά χαρακτηριστικά που προσθέτουν σημαντικά στην αξία του «Πάουερ Πλάστικ», πέρα από την ισχύ που παράγει. Αυτό φαίνεται από εφαρμογές που έχουν αναπτύξει διάφορες εταιρίες όπως η Air Products που κατασκευάζει παράθυρα, που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, ενσωματώνοντας το «Πάουερ Πλάστικ», ή η Sky Shades που παράγει υφάσματα σκίασης που ενσωματώνουν το «Πάουερ Πλάστικ» (εικόνα 3.19)

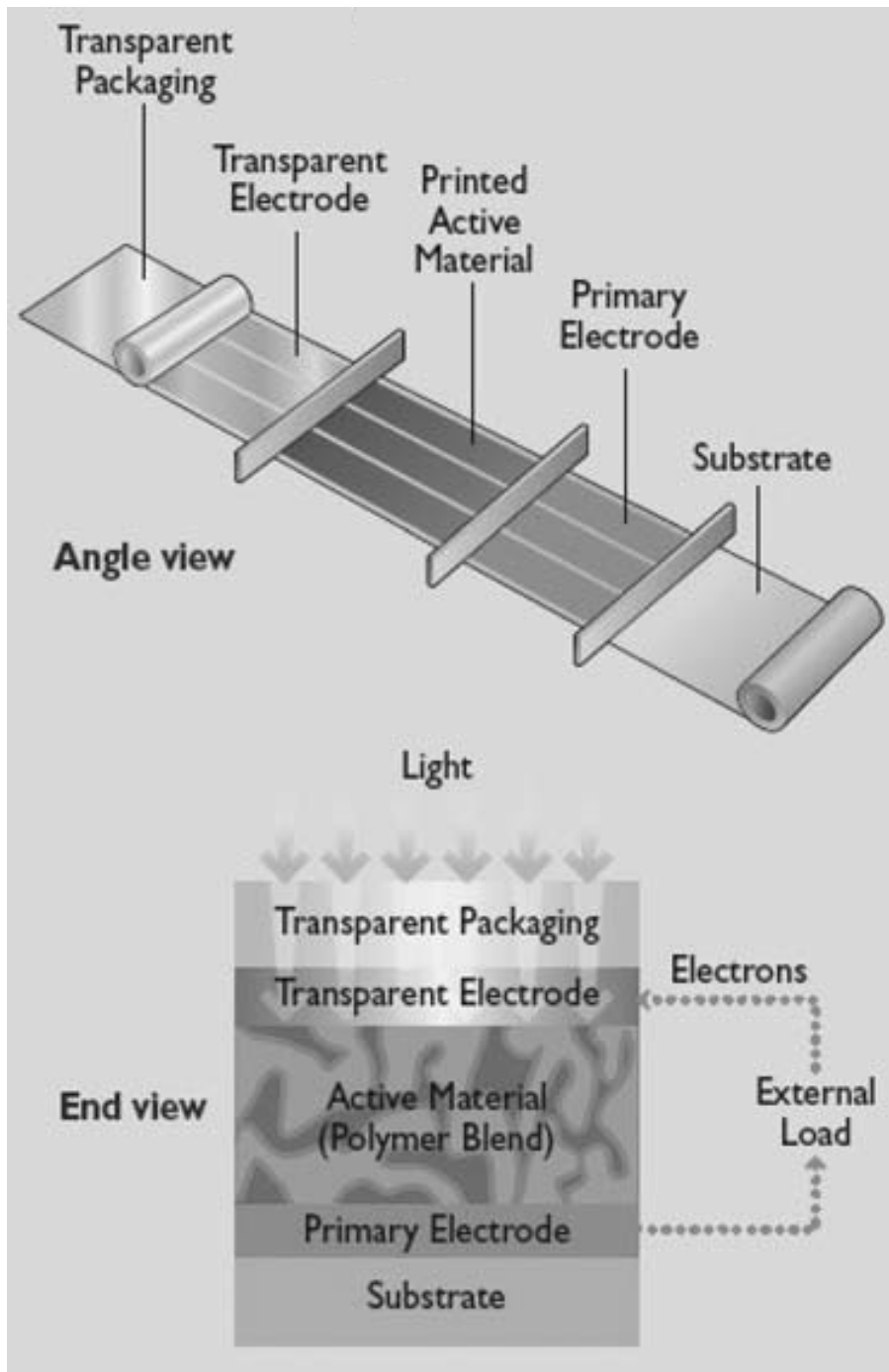
Το μίγμα πολυμερών εκτυπώνεται μεταξύ του αρχικού ηλεκτροδίου και του διάφανου ηλεκτροδίου, τα οποία μετέπειτα «αγκαλιάζονται» από το υπόστρωμα και το διάφανο υλικό συσκευασίας (εικόνα 3.20). Το τελικό προϊόν είναι μόλις 50-250nm πάχους.



Εικόνα 3.19 Με την ενσωμάτωση Power Plastic σε ύφασμα σκίασης επιτυγχάνεται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα του προϊόντος όσον αφορά το κόστος, τη μορφή και την ευελιξία σύμφυτη με την τεχνολογία είναι αυτονόητα. Το «Πιάουερ Πλάστικ» είναι φθηνό (πέντε φορές λιγότερο από τα παραδοσιακά ηλιακά), ελαφρύ (50 gm^{-2}) εύελικτο (μπορούν να χρωματιστούν, με σχέδια και σε επιθυμητές διαστάσεις για τον πελάτη), και εύελικτο (εύκολα προσαρμόσιμο σε διάφορες εφαρμογές. (Σχήμα 3.21).

Μια σχετική εφαρμογή θα είναι τα ηλιακά ιστία. Τέτοια πανιά ήδη διερευνώνται σε όλο τον κόσμο και αποτελούν εν δυνάμει μια τεράστια αγορά (Σχήμα 3.22). Μόλις ενσωματωθεί στο ύφασμα του πανιού, το οργανικό υλικό Φ/Β σταθεροποιείται, για τις σκληρές συνθήκες της ναυσιπλοΐας στην ανοικτή θάλασσα, και θα παρέχει στα πλοία αύξηση των επιπέδων ενέργειάς τους, πέρα από το ποσό που απαιτείται για να τροφοδοτήσει τις ηλεκτρονικές συσκευές πλοήγησης.



Εικόνα 3.20 Η δομή του Power Plastic.



Σχήμα 3.21 Το πλοίο χρησιμοποιεί ένα υβριδικό κινητήρα (DIESEL και ηλεκτρικό) με την ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από Φ/Β λεπτού Φιλμ είτε πυριτίου (Si) είτε οργανικά (πολυμερή με νανοσωλήνες άνθρακα). (Χορηγία εικόνας: Michelangelo Calamai & Figli).

Συμπερασματικά, ο τομέας των οργανικών Φ/Β τελεί υπό άνηση και οι τρεις πιο σημαντικές πτυχές της επιτυχημένης σχεδίασης της συσκευής: τα υλικά, η φυσιολογία της συσκευής, και οι τεχνολογίες κατασκευής, αντιμετωπίζονται με όλο και μεγαλύτερη επιτυχία. Μετά την μεγάλης κλίμακας εμπορευματοποίηση, που έχει αρχίσει από το 2008, τουλάχιστον στις Η.Π.Α., τα πλεονεκτήματα, από την άποψη της ολοκλήρωσης του συστήματος, μεγάλης κλίμακας κατασκευής με την τεχνολογία “R2R” και το κόστος παραγωγής ανοίγουν το δρόμο για μια θεαματική εμπορική επιτυχία που θα τροφοδοτήσει περαιτέρω δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας και τελικά την ενσωμάτωση της βιομηχανίας Φ/Β με μια εντελώς νέα οικογένεια προϊόντων.

4. Οργανικά-Ανόργανα Λεπτά Φιλμ

4.1 Βαφή Κυψελών: Μια Ευέλικτη Υβριδική Τεχνολογία

Τα φύλλα των φυτών είναι μικροσκοπικά εργοστάσια στα οποία το φως του ήλιου μετατρέπει το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό σε υδατάνθρακες και οξυγόνο. Δεν είναι πολύ αποδοτικά, αλλά είναι όμως πολύ αποτελεσματικά σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών του ηλιακού φωτός. Παρά την χαμηλή απόδοση και το γεγονός ότι τα φύλλα πρέπει να αντικαθίστανται, η διαδικασία έχει δουλέψει για εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια και αποτελεί την πρωταρχική πηγή ενέργειας για όλη τη ζωή πάνω στη γη.

Από το 1970, έχουν γίνει προσπάθειες να δημιουργηθεί μια καλύτερη ηλιακή κυψέλη με βάση αυτή την αρχή. Υπήρξαν πρώιμες προσπάθειες για την κάλυψη των κρυστάλλων του ημιαγώγιμου διοξειδίου του τιτανίου με ένα στρώμα χλωροφύλλης. Ωστόσο, τα ηλεκτρόνια ήταν «απρόθυμα» να κινηθούν μέσα από το στρώμα της χρωστικής ουσίας, έτσι η απόδοση, των πρώτων ευαισθητοποιημένων με τον τρόπο αυτό ηλιακών κυψελών ήταν περίπου 0,01%. Στη συνέχεια, το 1991, στην Ελβετία, οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι η νανοτεχνολογία θα μπορούσε να ξεπεράσει το πρόβλημα.

Αντί να χρησιμοποιήσουν ένα μόνο μεγάλο κρύσταλλο ημιαγώγου διοξειδίου του τιτανίου (titania - τιτάνια), εργάστηκαν με ένα σφουγγάρι από μικρά σωματίδια, περίπου είκοσι νανόμετρα σε διάμετρο το κάθε ένα, επικαλυμμένο με ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα χρωστικής ουσίας. Η μέθοδος αυτή αύξησε την διαθέσιμη ωφέλιμη επιφάνεια για την απορρόφηση του φωτός. Έτσι το φως του ήλιου μετατράπηκε πολύ αποτελεσματικά σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Η αρχή λειτουργίας της βαφο-ευαισθητοποιημένης ηλιακής κυψέλης φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Το σύστημα, για το οποίο έχει αναφερθεί συνολική απόδοση έως και 11%, περιλαμβάνει ένα φωτοευαισθητοποιητή που συνδέεται (συνήθως, από $-COOH$, $-PO_3H_2$, ή $-B(OH)_2$ λειτουργικές ομάδες) στην επιφάνεια ημιαγωγών, μια λύση που περιέχει ένα οξειδοαναγωγικό μεσολαβητή, και ένα μεταλλικό βοηθητικό ηλεκτρόδιο¹⁷ (CE). Ο ευαισθητοποιητής διεγείρεται αρχικά με απορρόφηση του φωτός. Ο διεγερμένος ευαισθητοποιητής εγχύει τότε ένα ηλεκτρόνιο, σε χρονικό διάστημα από

¹⁷ Βοηθητικό ηλεκτρόδιο (CE) είναι το στρώμα για τη μείωση των οξειδοαναγωγικών ειδών που οξειδώνονται στο ηλεκτρόδιο εργασίας. Κανονικά, η πλατίνα (Pt) χρησιμοποιείται για αυτό το στρώμα λόγω της υψηλής καταλυτικής ιδιότητάς της. Ένα λεπτό στρώμα νανοσωματιδίων Pt απλώνεται πάνω στο FTO (ένα αγώγιμο υπόστρωμα γυαλιού επικαλυμμένο με ένα λεπτό στρώμα από οξειδίου του κασσίτερου ενισχυμένο με φθόριο, FTO) με θερμική αποσύνθεση, ψεκασμό ή ηλεκτροχημική εναπόθεση.

femtosecond (10^{-15} sec) έως picosecond (10^{-12} sec), στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Ο οξειδωμένος ευαισθητοποιητής μειώνεται από ένα *μόριο αναμετάδοσης*¹⁸, το οποίο στη συνέχεια διαχέεται και αποφορτίζει στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο το οποίο είναι αγωγίμο γυαλί. Ως αποτέλεσμα, ένα δυναμικό φωτός δημιουργείται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων σε ανοικτό κύκλωμα και ένα αντίστοιχο φωτορεύμα μπορεί να επιτευχθεί με το «κλείσιμο» του εξωτερικού κυκλώματος με χρήση του κατάλληλου φορτίου.

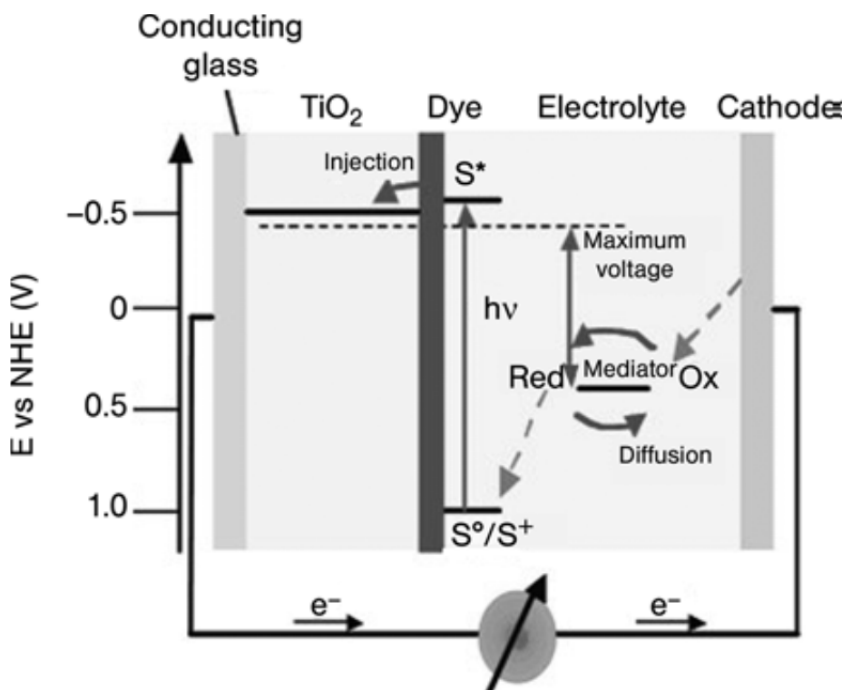
Ένας μεγάλος αριθμός φωτοευαισθητοποιητών, της οικογένειας Ru-oligopyridine (Ρουθήνιο-ολιγοπυριδίνη), έχουν χρησιμοποιηθεί, οι οποίοι εμφανίζονται να έχουν διεγερμένη κατάσταση μεταφοράς φορτίου μετάλλου-προς-σύμπλοκο, (**Metal-to-Ligand Charge-Transfer / MLCT**). Στην ανόργανη χημεία τα περισσότερα σύμπλοκα μεταφοράς φορτίου, περιλαμβάνουν μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ ατόμων μετάλλου και συμπλόκων. Οι μπάντες μεταφοράς φορτίου σε σύμπλοκα μετάλλων μετάβασης προκύπτουν από την αλλαγή πυκνότητας φορτίου μεταξύ μοριακών τροχιακών (**Molecular Orbitals / MO**). Όταν το φορτίο μετατοπίζεται από τα μοριακά τροχιακά του μετάλλου προς τα μοριακά τροχιακά σύμπλοκα, τότε το σύμπλεγμα ονομάζεται MLCT. Τα πλέον αποτελεσματικά είναι αυτοί που φέρουν δύο NCS (N-Chlorosuccinimide / Άζωτο-Χλωροσουξιμινίδιο) και δύο **hpy** (ισομερές της οικογένειας διπυριδίνης) σύμπλοκα, δείχνοντας έντονη απορρόφηση στις ζώνες της ορατής περιοχής. Έχουν χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία διαλυτών, διαφορετικού ιξώδους, και μεσολαβητών οξειδοαναγωγής. Το πιο κοινό είναι το ζεργάρι I^3^- / I^- στο διάλυμα ακετονιτριλίου (acetonitrile).

Οι βαφο- ευαισθητοποιημένες ηλιακές κυψέλες (**DSC**) εφευρέθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εισήλθαν στην παγκόσμια αγορά το 2003 με τις πρώτες εμπορικές μονάδες που βασίζονται σε αυτήν την ευέλικτη υβριδική (οργανική-ανόργανη) τεχνολογία να έχουν εγκατασταθεί στην Αυστραλία.

Με τις πλαστικές ηλιακές κυψέλες, τα DSCs μοιράζονται το χαμηλό βάρος, την ευελιξία και το χαμηλό κόστος παραγωγής, λόγω της κατασκευής “R2R” των λεπτών Φιλμ μονάδων. Ωστόσο, η τυπική αποδοτικότητα της τάξης του 7% των εμπορικών μονάδων είναι περίπου διπλάσιας αποδοτικότητας των πολυμερών μονάδων, ενώ οι καλές επιδόσεις τους σε διάχυτο φωτισμό είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό με τις ηλιακές κυψέλες ανόργανου λεπτού φιλμ. Τέλος, τα DSCs λειτουργούν καλά σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών φωτισμού και προσανατολισμού (του προσπίπτοντος φωτός) και είναι λιγότερο ευαίσθητα σε μερική σκίαση και σε χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού. Όλες αυτές οι ιδιότητες τα κάνουν ιδιαίτερα κατάλληλα για αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, χρωματιστές μονάδες DSC είναι εξαιρετικά πολυλειτουργικές στα κτήρια, αφού είναι σε θέση να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, είτε από εξωτερικό φως της ημέρας είτε από το φως των εσωτερικών χώρων, ενώ

¹⁸ Τα μόρια που αναμεταδίδουν ένα σήμα από τον δέκτη με ανταπόκριση, ονομάζονται μόρια αναμετάδοσης.

λειτουργούν ως ήχο / θερμική - μόνωση και ως υλικό προστασίας από την κακοκαιρία (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα λειτουργίας βαφο-ευαισθητοποιημένης νανοκρυσταλλικής ηλιακής κυψέλης. Αποτυπώνονται οι διαφορετικές φάσεις των ενεργειακών επιπέδων.

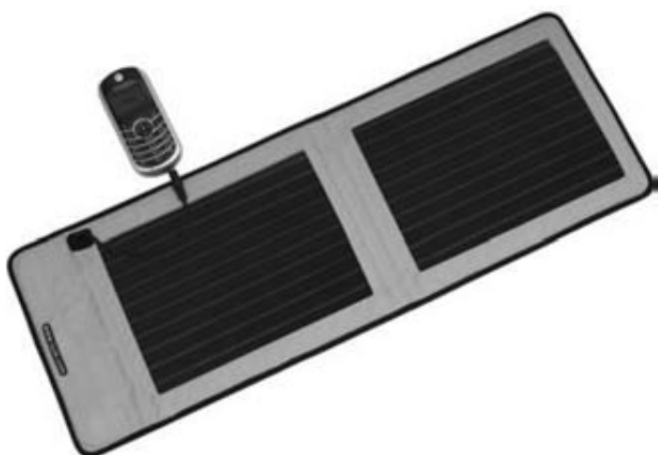
Η αυστραλιανή εταιρεία Dyesol υπήρξε πρωτοπόρος στην εμπορευματοποίηση των DSCs και ανέπτυξε την τεχνολογία σχεδόν σε κάθε πτυχή της, συμπεριλαμβανομένων και της μηχανικής τους. Ένα τυπικό ηλιακό πάνελ που διατίθεται από την εταιρεία (Σχήμα 4.3) είναι κατασκευασμένο από χρωματιστά «πλακάκια» - κομμάτια (διατίθενται σε ώχρα, γκρι, πράσινο και μπλε χρώμα) που συνδέονται (σε σειρά ή παράλληλα) και ανάμεσα σε δύο στρώματα από γυαλί.

Η Dyesol κατασκευάζει τις ηλιακές κυψέλες με τη μορφή των αρχιτεκτονικών πάνελ για την οικοδόμηση προσόψεων και στεγών. Στην Konarka Technologies, ερευνητές αναπτύσσουν χαμηλού κόστους διαδικασίες παραγωγής, για την παραγωγή κυψελών σε κυλίνδρους εύκαμπτων πλαστικών φύλλων για να προετοιμαστούν σε όλα τα είδη μεγεθών και σχημάτων και να εφαρμοστούν σε πολλά είδη επιφανειών.

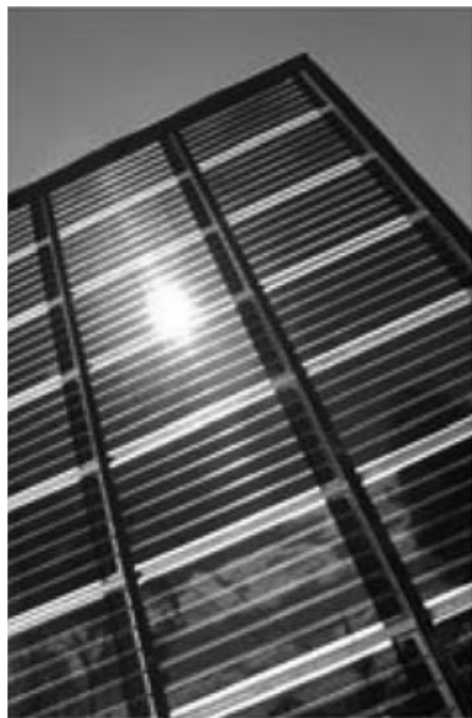


Σχήμα 4.2 Παράδειγμα εφαρμογής έγχρωμων DSC στο εσωτερικό κτηρίου (Schott Iberica Βαρκελώνη – Ισπανία).

Το 2007, η αμερικανική εταιρεία G24 Innovations ξεκίνησε εκτύπωση των DSC με χρήση τεχνολογίας “R2R”, ηλιακών πάνελ λεπτού φιλμ σε ένα εργοστάσιο στην Ουαλία (Ηνωμένο Βασίλειο). Τα παραγόμενα Φιλμ έχουν πάχος μικρότερο από 1mm και η αρχική παραγωγική ικανότητα του εργοστασίου έφτασε τα 25MW το 2007, ενώ είναι προγραμματισμένη η αύξησή της έως και τα 200MW στα επόμενα χρόνια, με βάση την ανταπόκριση της αγοράς στο προϊόν της εταιρίας. Το πρώτο προϊόν είναι ένα ηλιακός φορτιστής που λειτουργεί σε κλειστούς και εξωτερικούς χώρους, συμβατός με κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, συσκευές αναπαραγωγής ήχου και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές (Διάγραμμα 4.4).

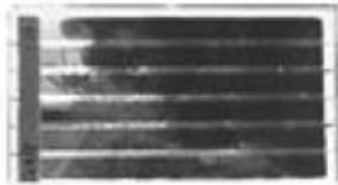


Εικόνα 4.4 Ηλιακός φορτιστής G10 της εταιρίας G24 Innovations.

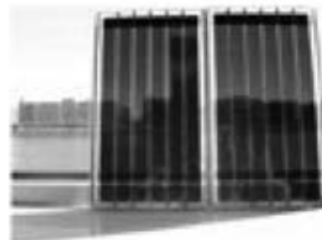


**Dyesol BIPV panel
(registered design)**

Dyesol tile



**Dyesol tile
(registered design)**



Εικόνα 4.3 DSC πάνελ της εταιρίας Dyesol.

Πολλές εταιρείες σε όλο τον κόσμο εργάζονται σε αυτόν τον τομέα, συμπεριλαμβανομένης της Mitsubishi, Dai Nippon, Peccell Technologies Sharp, Toshiba, IMRA-Aisin Seiki / Toyota, Sony Japan και Solaronix Switzerland. Η Sony και η Sharp, για παράδειγμα, έχουν ήδη αναπτύξει υψηλής απόδοσης πάνελ DSC, που έχουν ήδη παρουσιαστεί σε διεθνείς εκθέσεις φωτοβολταϊκών και μπορούν πλέον να διατεθούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι κυψέλες θα είναι διαθέσιμες είτε με τη μορφή εύκαμπτων ηλιακών πάνελ ή άκαμπτων και πολύ σταθερών πάνελ, όπως και το νέο πάνελ CIS που εξετάσαμε στο κεφάλαιο 2. Σε γενικές γραμμές, τα προϊόντα που προβλέπονται από τους παραγωγούς καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από πολύχρωμα διακοσμητικά στοιχεία έως κομμάτια υαλοπίνακα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για την ένταξή τους σε προσόψεις κτιρίων.

Στο Ισραήλ, η Orion Solar έχει αναπτύξει φθηνά πάνελ $15 \times 15 \text{cm}^2$ βαμμένων κυψελών, με βάση μια χαμηλού κόστους μέθοδο απόθεσης (Σχήμα 4.5).

Το ενδιαφέρον σε αυτόν τον τομέα των DSC αποδεικνύεται από τον μεγάλο αριθμό των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, περισσότερα από 300 το 2005, και από την πρόσφατη εκκίνηση οργάνωσης μιας σειράς συνεδρίων με θέμα την βιομηχανοποίηση των DSC. (www.dyesol.com/conference)



Σχήμα 4.5 Βαμμένες κυψέλες της Otionsolar, έχουν το επιπλέον πλεονέκτημα καταλληλότητας σε θερμότερα κλίματα.

4.2 Αρχές Λειτουργίας DSC

Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα Φ/Β στα οποία οι ίδιοι οι ημιαγωγοί απορροφούν το φως και λειτουργούν ως φορείς φορτίου, τα DSC βασίζονται στην απορρόφηση και μεταφορά φορτίου από ξεχωριστό είδος. Ως εκ τούτου, μια χρωστική ουσία - ευαισθητοποιητής ενισχύει τον ημιαγωγό TiO_2 , απορροφά το φως και στη συνέχεια μεταφέρει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας των ημιαγωγών (Conduction Band / CB), μέσω του οποίου τα ηλεκτρόνια οδηγούνται σε ένα ηλεκτρόδιο που λειτουργεί ως συλλέκτης φορτίου.

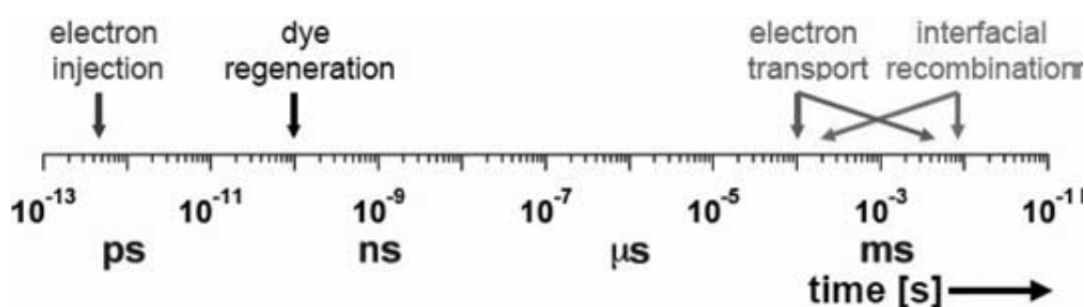
Το πρώτο παράδειγμα DSC υψηλής απόδοσης μετατροπής χρησιμοποίησε μια οπτικά διαφανή μεμβράνη πάχους 10 mm, σωματιδίων TiO_2 , μερικών δεκάδων nm σε μέγεθος, επικαλυμμένων με μια μονοστρωματική χρωστική ουσία μεταφοράς φορτίου ευαισθητοποιώντας το Φιλμ για την ηλιακή «συγκομιδή». Αξίζει να σημειωθεί ότι, ακόμη και αυτή η πρώτη κυψέλη είχε απόδοση της τάξης του 7,1% και πυκνότητα φωτορεύματος μέχρι 12 mAcm^{-2} .

Επιπλέον, η απόδοση των DSC επηρεάζεται ελαφρά μόνο από τη θερμοκρασία, σε αντίθεση με τις άλλες διαθέσιμες ανταγωνιστικές τεχνολογίες. Διακύμανση της θερμοκρασίας της τάξης των 20-60 °C δεν έχει πρακτικά σχεδόν καμία επίδραση στην συνολική απόδοση της κυψέλης.

Το διάγραμμα λειτουργίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, Φ/Β DSC είναι ένα κινητικό φαινόμενο. Πράγματι, όταν το ηλεκτρόνιο μεταφέρεται στην CB, η επιλεγμένη θερμοδυναμική διαδικασία είναι η αντίθετη αντίδραση με τον οξειδωμένο ευαισθητοποιητή που θα παράγει μόνο θερμική διάχυση. Για παράδειγμα, με τα αποτελεσματικά συμπλέγματα ρουθηνίου (Ruthenium), η προς τα εμπρός διαδικασία έγχυσης εμφανίζεται σε femtoseconds (10^{-20} s), ενώ η αντίθετη αντίδραση

φωτοέγχυσης ηλεκτρονίων στη CB με την οξειδωμένη βαφή εμφανίζεται σε microseconds (μs) (σχήμα 4.6).

Το σχήμα 4.7 δείχνει τις διεργασίες έγχυσης και ανασυνδυασμού. Η προσαρμογή της διεπαφής ημιαγωγού / ευαίσθητοποιητή για την ελαχιστοποίηση της αντίθετης αντίδρασης είναι ένας σημαντικός στόχος της τρέχουσας έρευνας. Μια τέτοια αντίδραση ανασυνδυασμού είναι πολύ ευαίσθητη στην πληρότητα παγίδας ηλεκτρονίων του νανοκρυσταλλικού TiO_2 , για παράδειγμα, με τον κινητικό ανασυνδυασμό επιτάχυνσης να κυμαίνεται από χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms) έως picoseconds (ps) καθώς εφαρμόζεται μια ηλεκτρική πόλωση στο Φιλμ για την αύξηση πληρότητας της παγίδας. Ως εκ τούτου, αυτή η αντίδραση μπορεί να είναι κρίσιμη για τον περιορισμό της απόδοσης της συσκευής.



Εικόνα 4.6 Φωτοβολταϊκά DSC έχουν καταστεί δυνατά από τη νίκη του δυναμικού ανταγωνισμού μεταξύ μεταφοράς ηλεκτρονίων (που εμφανίζεται σε femtoseconds) και διεπαφικού ανασυνδυασμού (που εμφανίζεται σε μικροδευτερόλεπτα).

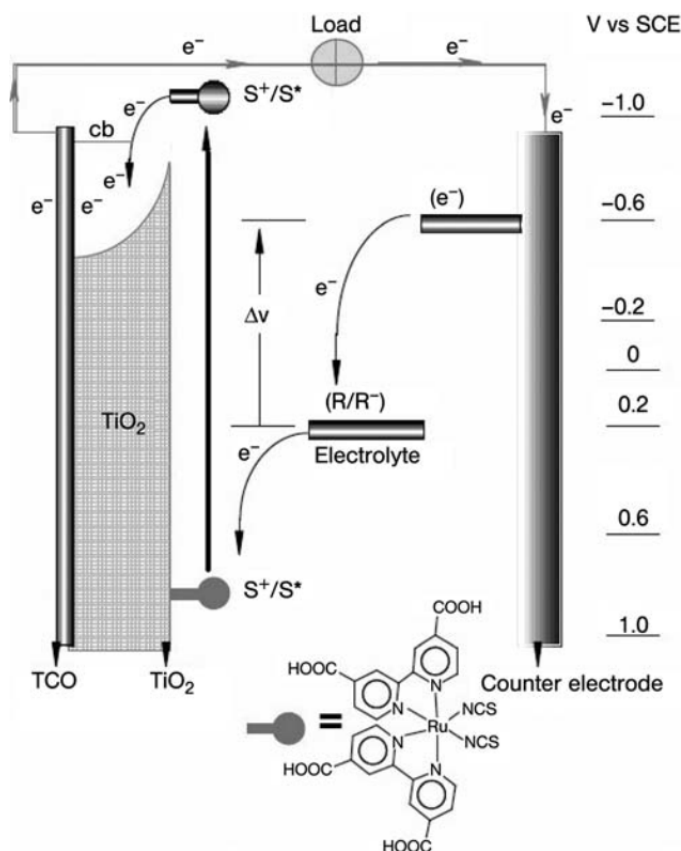
Εκτός του ότι είναι ένας εξαιρετικά αποτελεσματικός ημιαγωγός, το TiO_2 είναι επίσης άφθονο, χαμηλού κόστους, μη τοξικό και βιο-συμβατό. Συνήθως, νανοκρύσταλλοι TiO_2 με μεσοδομή σε *φάση ανάτασης*¹⁹ παρασκευάζονται από υδροθερμική επεξεργασία διαλύματος ζελατίνης (**sol-gel**) του κατάλληλου τιτανίου, πρόδρομη ουσία για την παρουσία ενός προτύπου όπως το *Pluronic P123*²⁰. Η ξηρά ζελατίνη (**xerogel**) είναι απομονωμένη ως ένα λεπτό Φιλμ που βασίζεται στο γυαλί με επιπλέον κάλυψη από άλλο αγώγιμο στρώμα.

¹⁹ Ένα σπάνιο μπλε ή ανοικτό κίτρινο έως καφέ ανόργανο κρυσταλλικό σώμα, το σπανιότερο από τις τρεις μορφές του διοξειδίου του τιτανίου, TiO_2 , που χρησιμοποιείται ως χρωστική ύλη, ειδικά στις βαφές.

²⁰ Pluronic P-123 είναι η εμπορική ονομασία για ένα τριων-μπλοκ συμπολυμερές όπου κατασκευάζεται από την BASF Corporation. Ο χημικός τύπος είναι $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{20}(\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{O})_{70}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{20}\text{H}$, ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα μοριακό βάρος περίπου 5800 Da (Da = Dalton, 1 Da = 1 g/mol, χρησιμοποιείται ως μονάδα μοριακής μάζας κυρίως στη βιοχημεία). Τα τριων-μπλοκ συμπολυμερή βασίζονται σε πολυ (αιθυλενογλυκόλης)-πολυ (προπυλενογλυκόλη)-πολυ (αιθυλενογλυκόλης), γνωστο γενικά ως πολοξαμέριο, και είναι παρόμοιο με το υλικό που κατασκευάζουν άλλες εταιρείες.

Το μεσοπορώδες εξασφαλίζει εξαιρετική διείσδυση από τον ηλεκτρολύτη στο εσωτερικό πορώδες των κελιών sol-gel του Φιλμ, ενώ μια μεγάλη τραχύτητα της επιφάνειας (παράγοντας τραχύτητας > 1000) ευνοεί τη διείσδυση του φωτός μέσα από εκατοντάδες μονοστρώματα προσροφημένης βαφής. Η απόπτωση στους 400-500 °C στερεώνει την μεσοπορώδη δομή και ελευθερώνει το οξείδιο της από υπολείμματα οργανικής ύλης.

Ένα τυπικό Φιλμ έχει τη δομή που φαίνεται στο σχήμα 4.8 και τις ιδιότητες που αναφέρονται στο Πίνακα 5.1.

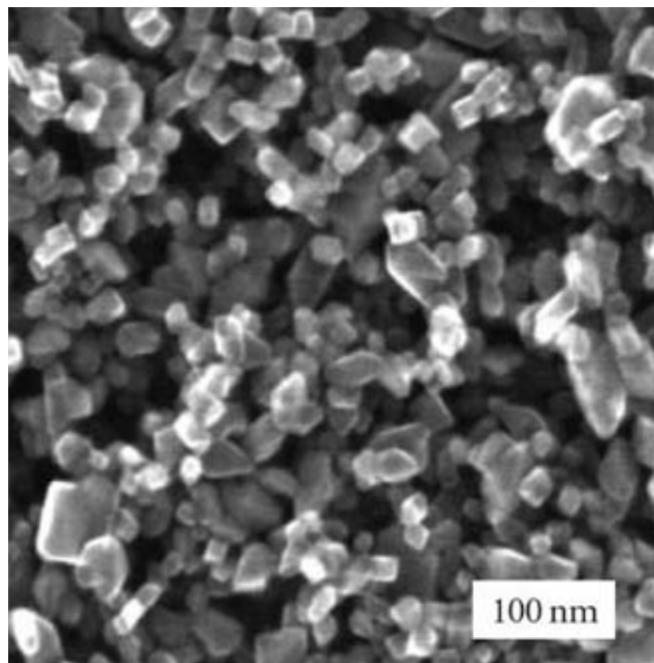


Σχήμα 4.7 Διαδικασίες ανασυνδυασμού και έγχυσης στην επιφάνεια Φιλμ TiO₂ σε μία τυπική DSC.

Χρησιμοποιώντας μια τεχνική αποκόλλησης, προενσωματωμένα πορώδη, σύνθετα στρώματα που περιλαμβάνουν νανοσωματίδια TiO₂ πάχους μερικών μόνο δεκάδων μικρομέτρων, εύκολα μπορούν να μεταφερθούν σε ένα δεύτερο εύκαμπτο υπόστρωμα. Οι αρχικές ηλεκτρικές ιδιότητες των μεταφερμένων πορώδων στρωμάτων διατηρούνται. Έτσι παρακάμπτεται η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί διαδικασία θερμοκρασιών έως και 500 °C, που χρησιμοποιούνται συνήθως για θερμοενσωμάτωση νανοσωματιδίων TiO₂, μιας και τα τυπικά πλαστικά εύκαμπτα υποστρώματα δεν μπορούν να αντέξουν. Έτσι έχει ανοίξει ο δρόμος για μαζική παραγωγή πλαστικών ηλιακών κυψελών που βασίζονται στην τεχνολογία DSC.

Ένα πλαστικό υπόστρωμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αντέξει εύκαμπτες ηλιακές κυψέλες, των οποίων η απόδοση βελτιώνεται πολύ με μια μέθοδο

που συνίσταται στην μηχανική συμπίεση υδατικής πάστας TiO_2 για την επίστρωση του φιλμ και την προπαρασκευή του φωτοηλεκτροδίου TiO_2 χωρίς τη χρήση διαδικασιών με θερμότητα.



Σχήμα 4.8 Εικόνα SEM^{21} Φιλμ νανοκρυσταλλικού TiO_2 ανατάσης, που χρησιμοποιείται σε προϊόντα βαφής-ευαισθητοποιημένων ηλιακών κυψελών.

Πίνακας 4.1 Κοινές ιδιότητες ανατάσης TiO_2 Φιλμ που χρησιμοποιήθηκαν σε βαφο-ευαισθητοποιημένες ηλιακές κυψέλες.

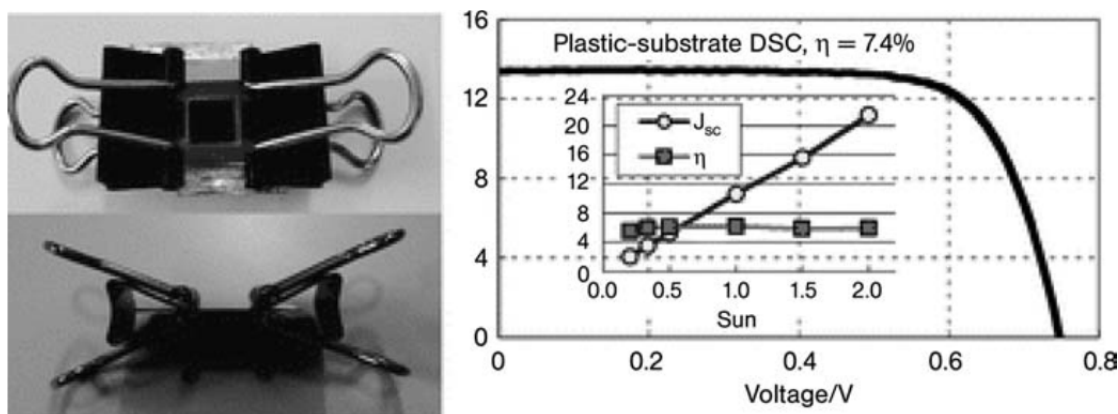
Particle Size (nm)	Film thickness (μm)	Porosity (%)	Average pore size (nm)
15-30	5-20	50-75	15

Η προκύπτουσα συσκευή (σχήμα 4.9) παρουσιάζει την υψηλότερη αποδοτικότητα μετατροπής φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, που βασίζεται σε πλαστικές ηλιακές κυψέλες βαφο-ευαισθητοποιημένου υπόστρωματος, 7,4% υπό

²¹ Ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) είναι ένας τύπος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου που απεικονίζει ένα δείγμα με σάρωση, χρησιμοποιώντας υψηλής ενέργειας δέσμη ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με τα άτομα που απαρτίζουν το δείγμα και παράγουν σήματα που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία της επιφάνειας, τη σύνθεση του δείγματος και άλλες ιδιότητες όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

φωτισμό 100 mWcm^{-2} (1 ήλιο) AM1.5. Το πρώτο εύκαμπτο DSC αναπτύχθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2003, είχε μια αξιοσημείωτη απόδοση 5,3% και βασίστηκε σε βαφο-ευαισθητοποιημένο Φιλμ ναοκρυσταλλικού TiO_2 , επίστρωσης Al_2O_3 , και πολυμερούς ηλεκτρολύτη I_2/NaI , ενισχυμένης στερεάς κατάστασης. Με την αλλαγή των πολυμερών ηλεκτρολυτών, τα χαρακτηριστικά της συσκευής ρεύματος-τάσης μπορούν να βελτιστοποιηθούν για να φτάσει την υψηλότερη απόδοση (σχήμα 4.10).

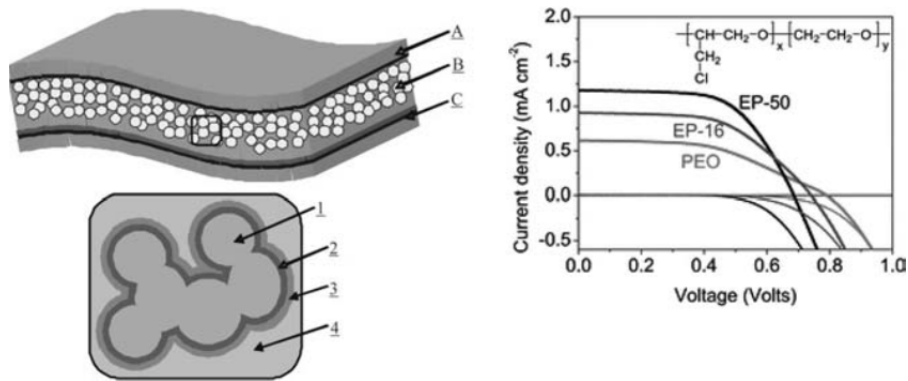
Το Πανεπιστήμιο της Γιοκοχάμα, σε συνεργασία με την Peccel Technologies, στην Ιαπωνία επιδιώκει την ανάπτυξη ηλιακών κυψελών πλαστικής βαφής (σχήμα 4.11) με χρήση πλαστικών ηλεκτροδίων τιτάνια.



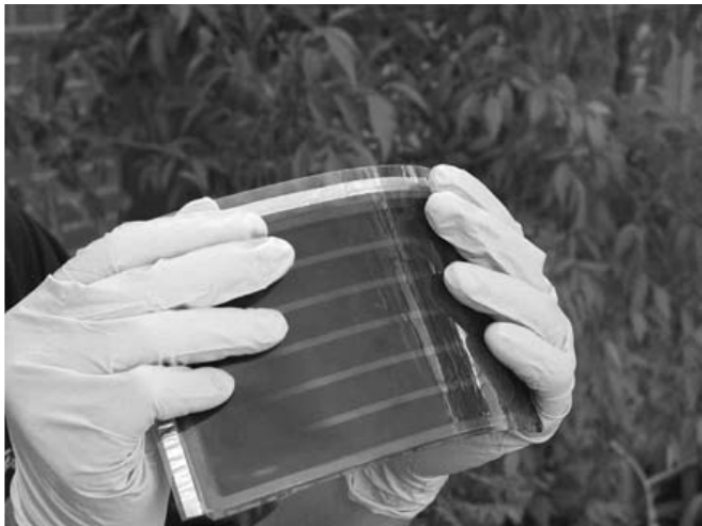
Σχήμα 4.9 Με απλό πάτημα, μπορεί εύκολα να γίνει λήψη μίας απόδοσης της τάξης του 7,4% εύκαμπτης DSC.

Σε γενικές γραμμές, κάθε φωτοδραστικό υλικό μπορεί να διαμορφωθεί με τη αντίστροφη μορφή οπάλ οδηγώντας σε αποτελέσματα που υπερβαίνουν το άθροισμα των μερών και μπορεί να αξιοποιηθεί για πρακτικούς λόγους. Στην περίπτωση αυτή το οπάλ είναι ένας κολλοειδής φωτονικός κρύσταλλος που είναι κατασκευασμένος από ανατάσης TiO_2 και ο ρόλος του είναι να ενισχυθεί η αποδοτικότητα της μετατροπής σε φασματικό εύρος (600-750 nm), όπου ο ευαισθητοποιητής σε αυτήν την περιοχή έχει κακή απορρόφηση. Η ενίσχυση απορρόφησης προκύπτει από τη θέση των άκρων της ζώνης φραγμού του στρώματος του οπάλ. Πράγματι, τα φωτόνια που διαδίδονται μέσα από ένα φωτονικό κρύσταλλο ενέχουν πολύ χαμηλή ταχύτητα, και αυτή η αργή κίνηση συνεπάγεται μεγαλύτερη πιθανότητα του φωτονίου να εγκλωβιστεί σε σχέση με το μη-διατεταγμένο υλικό.

Ως εκ τούτου, απλή σύζευξη μιας συμβατικής DSC με μια αντίστροφη οπάλ, επίσης από τιτάνια, οδηγεί σε αύξηση της J_{sc} σε όλο το ορατό φάσμα κατά περίπου 26% σε σχέση με συμβατικά βαμμένες ηλιακές κυψέλες που κατασκευάζονται από μια τυχαία συλλογή βαφο-ευαισθητοποιημένων ναοκρυστάλλων ανατάσης χωρίς φωτονικό κρυσταλλικό πλέγμα (σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.10 Τα νανοσύνθετα Φιλμ αποτελούνται από τέσσερις διακριτά δομικές οργανωμένες φάσεις: (1) νανοκρυσταλλικό Φιλμ TiO_2 , (2) επίστρωση Al_2O_3 , (3) βαφή $\text{Ru}(\text{L})_2(\text{NCS})_2$ και (4) οξειδοαναγωγός ενεργός πολυμερικός ηλεκτρολύτης ο οποίος έχει διεισδύσει τους πόρους του Φιλμ. (β) Χρήση διαφορετικών πολυμερών ηλεκτρολυτών, τα χαρακτηριστικά ρεύμα-τάση της συσκευής μπορούν να βελτιστοποιηθούν.



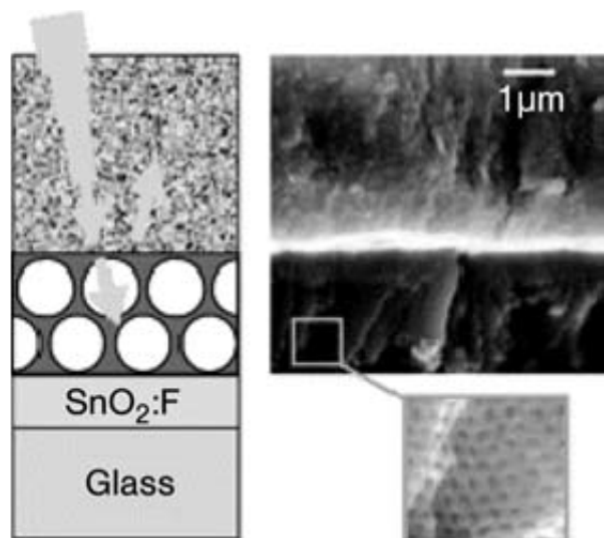
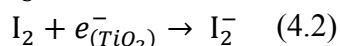
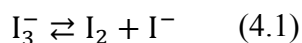
Σχήμα 4.11 Μία βαμμένη, εύκαμπτη, πλαστική ηλιακή κυψέλη κατασκευής της Peccell Technologies.

Για άλλη μια φορά, είναι η διστρωματική νανο-αρχιτεκτονική, παρά η ενισχυμένη συγκομιδή φωτός εντός της αντίστροφης δομής οπάλ, που είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο μέρος του κέρδους απόδοσης στην μετατροπή προσπιπτόντων φωτονίων σε ρεύμα (**IPCE**), λόγω της ενισχυμένης διασποράς.

Η «απελευθέρωση» των ηλεκτρονίων, από την υποζώνη ενεργειακού κενού στην CB, είναι υπεύθυνη για την μεταφορά ηλεκτρονίων. Η παρουσία παγίδων στο Φιλμ αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον περιορισμό της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς ηλεκτρονίων, εμποδίζοντας τη διέλευσή τους στο ηλεκτρόδιο εξαγωγής ηλεκτρονίων. Τέτοιες παγίδες είναι ως επί το πλείστον παρούσες στην επιφάνεια του TiO_2 παρά στο μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων ή στα όρια των κόκκων των ενδοσωματιδίων, καθώς ο αριθμός τους αυξάνεται ανάλογα με το εμβαδόν της εκτεθειμένης επιφάνειας.

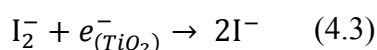
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το οξειδοαναγωγικό ζευγάρι στον ηλεκτρολύτη, ιωδιούχο/τρι-ιωδιούχο, λειτουργεί καλά, επειδή η μεταφορά ηλεκτρονίων από το

νανοκρυσταλλικό TiO_2 στο I_3^- είναι πολύ πιο αργή από ότι από ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο. Το δυναμικό του ζεύγους I_2^-/I^- καθορίζει την θερμοδυναμική κινητήρια δύναμη για την μεταφορά ηλεκτρονίων από το I^- στην οξειδωμένη β. Πράγματι, του μηχανισμού μεταφοράς ηλεκτρονίου από το TiO_2 στο I_3^- προηγείται μία αδύναμη διασπαστική *χημειορόφηση*²² του ιωδίου στο TiO_2 :

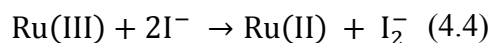


Σχήμα 4.12 Η σύζευξη ενός αντίστροφου στρώματος οπάλ οξειδίου του τιτανίου σε μία συμβατική DSC, επίσης από ανατάση, έχει σαν αποτέλεσμα την βελτίωση κατά 26% του φωτορεύματος βραχυκύκλωσης.

Η εξίσωση 4.1 έχει μια πολύ χαμηλή σταθερά ισορροπίας ($\sim 10^{-7}$ στο ακετονιτρίλιο), ενώ η ιωδική ρίζα θα μειωθεί περαιτέρω σε μια δεύτερη φάση μεταφοράς ηλεκτρονίου:

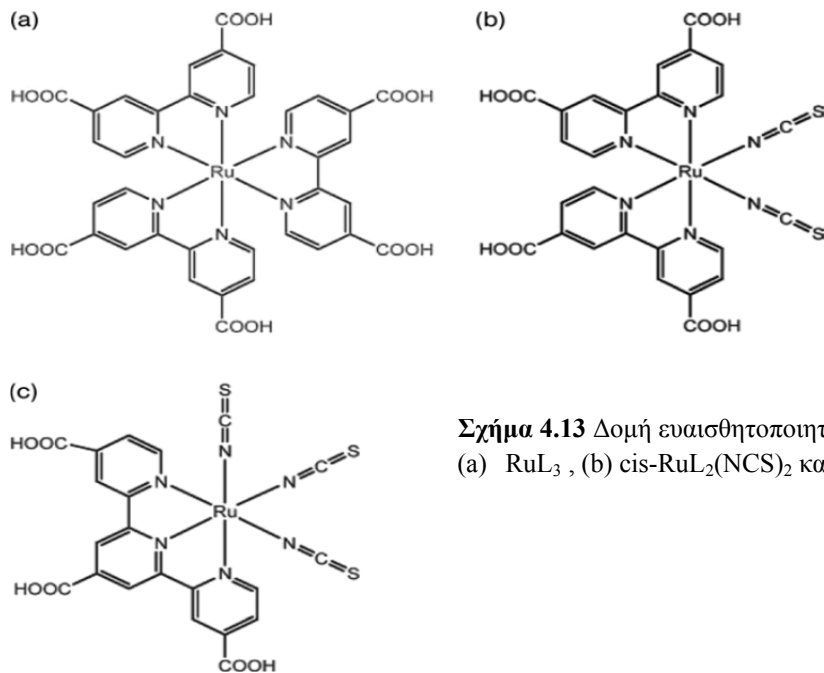


Η αναγέννηση της θεμελιώδους κατάστασης της χρωστικής ουσίας συνεπάγεται μείωση της οξειδωμένης βαφής από ιώδιο:

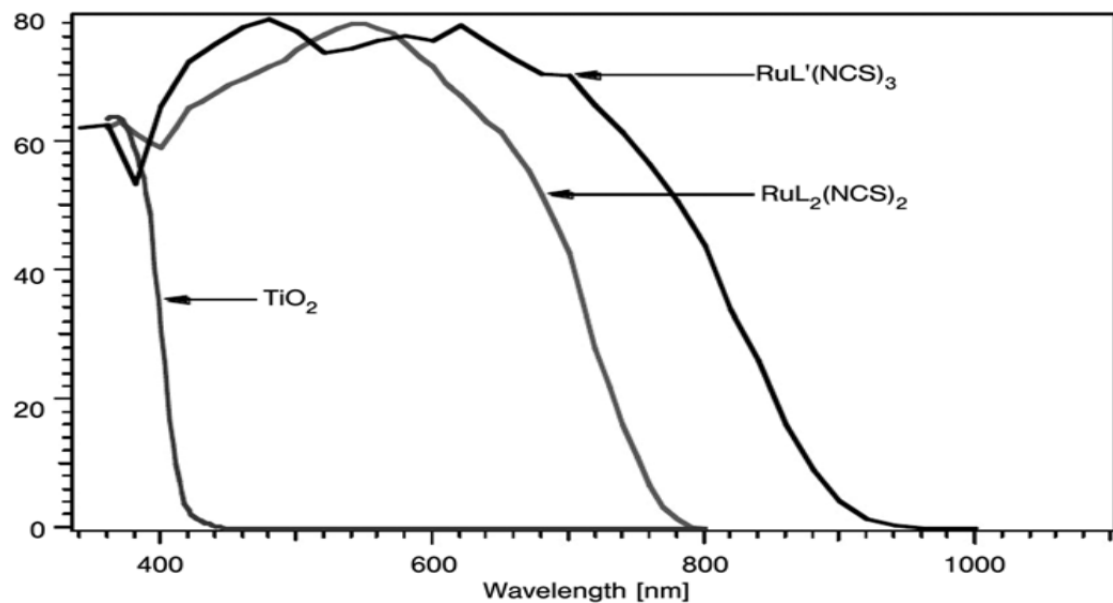


Γενικά οι ευαισθητοποιητές βασίζονται σε συμπλέγματα πολυπυριδυλίου του Ru με δομή του τύπου $\text{RuL}_2(\text{X})_2$ σχήμα 4.13.

²² Χημειορόφηση είναι μια υποκατηγορία της προσρόφησης, κινούμενη από μια χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην εκτεθειμένη επιφάνεια. Ένα νέο είδος χημικού παράγεται στην επιφάνεια προσρόφησης (π.χ. διάβρωση, μεταλλική οξείδωση). Η ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ της ουσίας προσρόφησης και της επιφάνειας του υποστρώματος δημιουργεί ένα νέου τύπου ηλεκτρονικό δεσμό, ιοντικό ή ομοιοπολικό, ανάλογα με τα χημικά είδη αντίδρασης που εμπλέκονται.



Σχήμα 4.13 Δομή ευαισθητοποιητών ρουθηνίου (a) RuL_3 , (b) $\text{cis-RuL}_2(\text{NCS})_2$ και (c) $\text{RuL}'(\text{NCS})_3$



Σχήμα 4.14 Απόδοση προσπίπτοντος φωτονίου σε ρεύμα που λαμβάνεται ως απόκριση «σκέτου» TiO_2 και TiO_2 «ευαισθητοποιημένου» από $\text{cis-RuL}_2(\text{NCS})_2$ και $\text{RuL}'(\text{NCS})_3$ ($L = 2,2'$ -διπυριδyl-4,4'-δικαρβοξυλικό οξύ και $L' = 2,2',2''$ - τεραπυριδyl -4,4',4''-τρικαρβοξυλικού οξύ).

Η φασματική απόκριση από αυτές τις χρωστικές ουσίες φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Η βελτίωση της IPCE στο ορατό φάσμα είναι σαφής σε σχέση με το «σκέτο» TiO_2 . Το οροπέδιο - κορυφή της αποδοτικότητας είναι και στις δύο περιπτώσεις

περίπου 80%, και η απόκριση του $\text{RuL}'(\text{NCS})_3$ έχει μία επιπλέον επέκταση 100nm στην περιοχή IR.

Ένα ιδανικός ευαισθητοποιητής θα πρέπει να απορροφά το φως κάτω από το όριο των περίπου 900 nm. Οι καρβοξυλικές και φωσφονικές ομάδες χρειάζονται προκειμένου να διασφαλιστεί ο εμβολιασμός της βαφής πάνω από την επιφάνεια των ημιαγωγών, και έτσι να έχουμε γρήγορη έγχυση ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας του TiO_2 . Η ακριβής ρύθμιση των μοριακών τροχιακών με κατάλληλη επιλογή των συμπλόκων οδηγεί τελικά σε μια έντονη μονάδα κβαντικής απόδοσης για την έγχυση ηλεκτρονίων ϕ_{inj} και μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ρεύμα της τάξης του 10,4%, όπως στην περίπτωση της βαφής $\text{RuL}'(\text{NCS})_3$ (Σχήμα 4.14).

Η οξειδοαναγωγή του ηλεκτρολύτη αναζωογονεί τον ευαισθητοποιητή, υπό την προϋπόθεση ότι οι αντίστοιχες οξειδοαναγωγικές δυνατότητες είναι συμβατές. Η σταθερότητα του ευαισθητοποιητή, άλλωστε, αποτελεί βασικό σημείο των DSC, και θα πρέπει να επιτευχθούν θεωρητικά 10^8 κύκλοι εργασιών χωρίς καμία σημαντική τροποποίηση. Αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 20 χρόνια έκθεσης στο φυσικό φως.

Η απόδοση συγκομιδής φωτός (**LHE**), σχετίζεται με το μήκος απορρόφησης και το πάχος της ταινίας μέσω του νόμου των Beer-Lambert (εξίσωση 4.5), ενώ η IPCE είναι ανάλογη με την κβαντική απόδοση για την έγχυση ηλεκτρονίων ϕ_{inj} και την απόδοση συλλογής ηλεκτρονίων η_{coll} (εξίσωση 4.6):

$$LHE(\lambda) = 1 - 10^{-ad} \quad (4.5)$$

$$IPCE(\lambda) = LHE(\lambda) \cdot \phi_{inj} \cdot \eta_{coll} \quad (4.6)$$

Στην οποία το $a = \sigma c$ είναι ανάλογο με την γραμμομοριακή απορροφητικότητα σ και c τη συγκέντρωσή του στο φιλμ. Όπου d η οπτική διατομή του ευαισθητοποιητή. Είναι σαφές ότι οι τιμές LHE εξαρτώνται έντονα από το μήκος κύματος, προσεγγίζοντας τιμές πάνω από 90% κοντά στα μέγιστα απορρόφησης των χρωστικών ουσιών. Μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές για να αυξηθεί η απορρόφηση στο ερυθρό και κοντά στο υπέρυθρο φάσμα. Η πιο συνήθης συνίσταται στην ενσωμάτωση μεγαλύτερων σωματιδίων TiO_2 (100-300 nm) σε μεσοπορώδη φιλμ, τη βελτίωση της απορρόφησης στις περιοχές όπου η οπτική διατομή του ευαισθητοποιητή είναι μικρή. Η χρήση μιγμάτων βαφής είναι μια ελκυστική επιλογή για να επιτευχθούν παγχρωματικές συσκευές στις οποίες αναμιγνύονται βαφές που απορροφούν σε διαφορετικές φασματικές περιοχές χωρίς καμία αρνητική παρεμβολή.

4.3 Ένας οδηγός για τις DSC

Οι βαμμένες, «ευαισθητοποιημένες» κυψέλες είναι πολύ ανεκτικές προς τις επιπτώσεις των προσμείξεων, διότι τόσο το φως απορρόφησης όσο και ο διαχωρισμός

φορτίου συμβαίνουν κοντά στην διασύνδεση μεταξύ των δύο υλικών. Η σχετική ανοχή στις προσμίξεις και η απλότητα επιτρέπει την εύκολη, ανέξοδη αναβάθμιση της κλίμακας σε υψηλό όγκο παραγωγής με βάση μη-κενού και χαμηλής θερμοκρασίας, μέσω συνεχών επεξεργασιών, συμπεριλαμβανομένης μεταξοτυπίας, ψεκασμού, πρέσας, ή R2R παραγωγής. Πράγματι, η κατασκευή των πρώτων βιομηχανικών μονάδων χρησιμοποιεί μια αυτοματοποιημένη R2R διαδικασία μετατρέποντας ένα ελαφρύ ρολό φύλλο μετάλλου σε 45 kg μισού μιλίου G24i Λ/Φ με χρήση «ευαισθητοποιημένης» βαφής σε λιγότερο από τρεις ώρες (Σχήμα 4.15).

Αυτό το υλικό είναι ανθεκτικό, ευέλικτο, ελαφρύ και παράγει ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και σε εσωτερικούς χώρους και σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Στη θέση των υγρών ηλεκτρολυτών, στερεοί ή ημι-στερεοί αγωγοί οπών μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά η μείωση της αποτελεσματικότητας αποκλείει επί του παρόντος την πρακτική τους εφαρμογή.

Οι πρώτοι που παραμένουν και πιο αποτελεσματικοί ηλεκτρολύτες ήταν υγροί, έτσι έπρεπε να αναπτυχθεί ο σχεδιασμός τόσο των κυψελών όσο και της μονάδας ώστε να εμποδίζει την διαρροή ηλεκτρολυτών για να αποφευχθεί η εξάτμιση. Η σταθερότητα και η διάρκεια ζωής των μονάδων DSC έχουν φθάσει σε σημαντικές τιμές (Σχήμα 5.16), ενώ γίνονται και ταχείες βελτιώσεις.

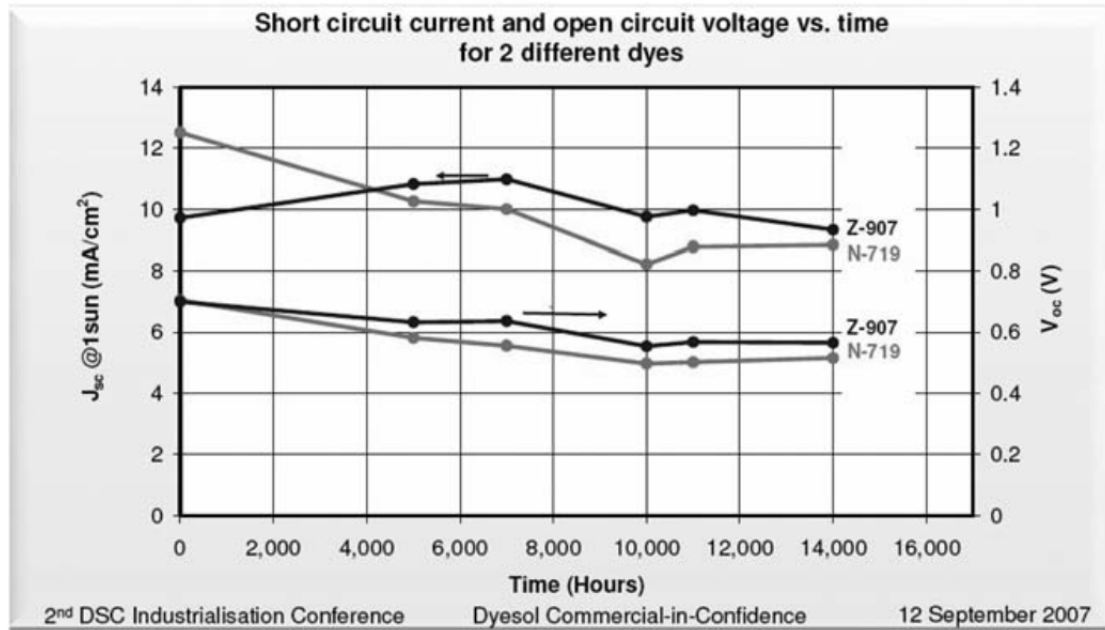


Σχήμα 4.15 Παραγωγή R2R της Φ/Β μονάδας είχε σας αποτέλεσμα ένα εύκαμπτο, ελαφρύ Φ/Β υλικό κατάλληλο για μια μεγάλη γκάμα διαφορετικών εφαρμογών.

Μια σημαντική εξέλιξη αποτελεί η πρόσφατη μονάδα DSC χωρίς διαλύτες σε ένα μίγμα ιοντικού υγρού (Ionic Liquid, **IL**), $C_{10}H_{11}BN_6$ και $C_7H_{13}IN_2$ ως ηλεκτρολύτη και το σύμπλεγμα ρουθηνίου, Ru (2,2'-διπυριδίνη-4,4'-δικαρβοξυλικό οξύ) (4,4'-δι (2 - (4-τριπ-βουτυλοξυ-φαινυλο) βινυλο) -2,2'- διπυριδίνη) (NCS)₂ ως ευαισθητοποιητής. Οι κυψέλες που προκύπτουν έχουν απόδοση μετατροπής φωτός 7,6%, κάτω από προσομοιωμένες συνθήκες ηλιακού φωτός και είναι σταθερά στους 80 °C στο σκοτάδι και στους 60 °C υπό ορατό φως για πάνω από χίλιες ώρες, με την απώλεια αποτελεσματικότητας των κυψελών να φτάνει μόνο το 10%, το οποίο σημαίνει τη δυνατότητα χρήσης τους σε εξωτερικούς χώρους σε θερμά κλίματα.



14,000 hours test ~0.8 sun, 55-60°C



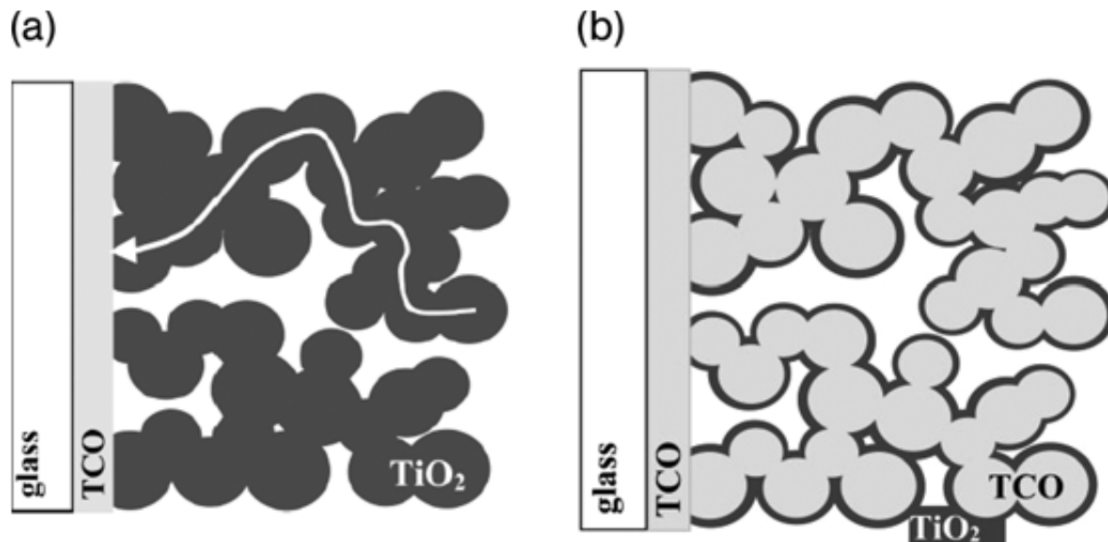
Σχήμα 4.16 Η σταθερότητα των μονάδων DSC έχει φτάσει τα 22 χρόνια στην Κεντρική Ευρώπη και τα 13 έτη για την πιο ζεστή, Νότια Ευρώπη. Ωστόσο, γίνονται ταχείες βελτιώσεις.. (Εικόνα από εταιρία Dyesol).

Το χαμηλό ιξώδες του διωνυμικού ιοντικού υγρού βοηθά να ξεπεραστούν προκλήσεις μαζικής μεταφοράς, ενώ το αδρανές ανιόν εξουδετερώνει την βλαβερή επίδραση των ανιόντων ιωδίου. Έτσι αποκτά τα εξής ποιοτικά χαρακτηριστικά: πυκνότητα φωτορεύματος βραχυκύκλωσης γύρω στα 14 mAcm^{-2} , τάσεις ανοιχτού κυκλώματος της τάξης του $0,7 \text{ V}$ και συντελεστής πλήρωσης της τάξης του $0,7$.

Αυτή είναι η υπόσχεση των IL για τις μελλοντικές μονάδες Φ/Β με χρήση βαφής. Η G24i, η πρώτη εταιρία παραγωγής των εν λόγω μονάδων έχει συνάψει συμφωνία με την BASF να εργαστούν για την επιλογή των κατάλληλων IL για την εφαρμογή τους στα επικείμενα προϊόντα τους.

Νέα ηλεκτρόδια υψηλής επιφάνειας έχουν ξεπεράσει τόσο τον ανασυνδυασμό όσο και την βραδεία διάχυση των εγχόμενων ηλεκτρονίων στο πορώδες στρώμα TiO_2 (Σχήμα 4.17).

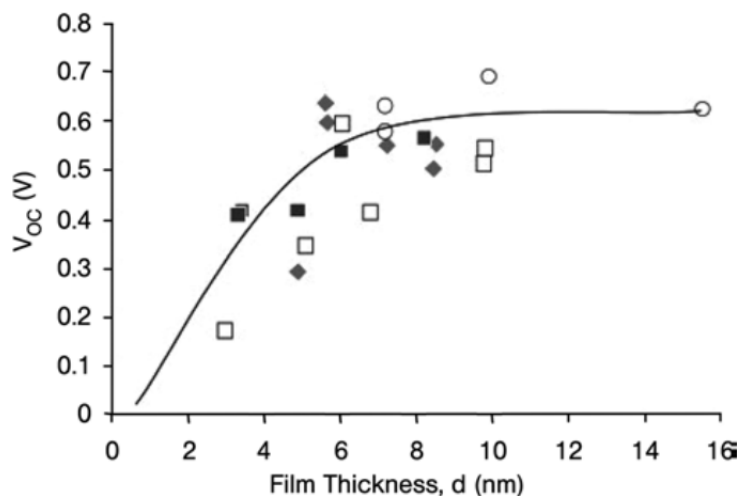
Ο νέος σχεδιασμός ηλεκτροδίου περιλαμβάνει μια διαμόρφωση του κελύφους του πυρήνα που αποτελείται από μία αγωγίμη νανοπορώδη μήτρα επικαλυμμένη με σταθερό, μεγάλου ενεργειακού κενού, TiO_2 (Σχήμα 4.17). Σε αυτό το ηλεκτρόδιο «συλλέκτη-κελύφους» η απόσταση μεταξύ του σημείου έγχυσης και του συλλέκτη ρεύματος μειώνεται σε αρκετά νανόμετρα από τα αρκετά μικρόμετρα



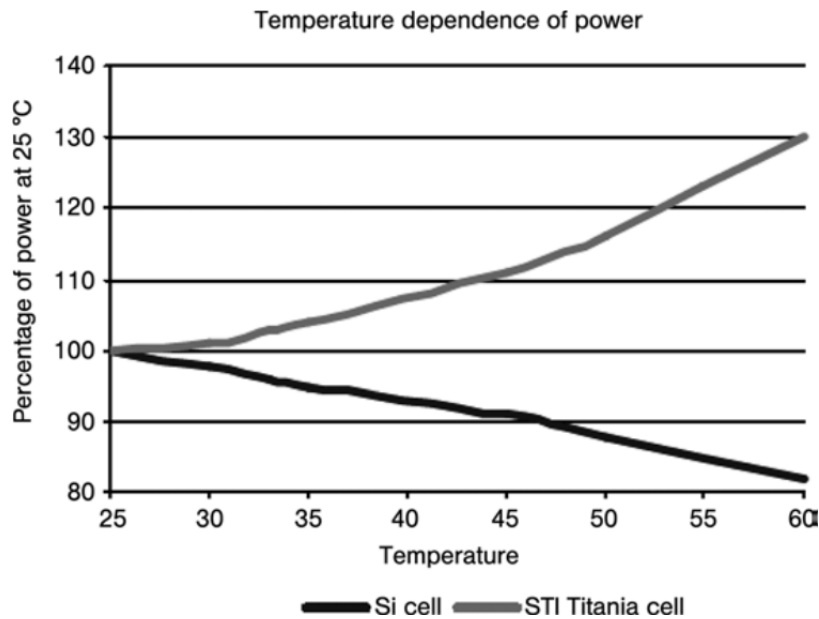
Σχήμα 4.17 Το νέο, αποτελεσματικό ηλεκτρόδιο για DSC βασίζεται σε έναν αγώγιμο νανοπορώδες πυρήνα (β) και όχι σε έναν ημιαγώγιμο πυρήνα (α) όπως και στο πρότυπο σχεδιασμού.

που συνδέονται με το πρότυπο ηλεκτρόδιο. Με άλλα λόγια, όλα τα ηλεκτρόνια που εγχέονται στο ηλεκτρόδιο, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που δημιουργούνται αρκετά μικρόμετρα μακριά από το υπόστρωμα, έχουν τώρα να ταξιδεύουν σε πολύ μικρή απόσταση πριν φτάσουν στον συλλέκτη ρεύματος. Αυτή η νέα σχεδίαση επιτρέπει τον αποτελεσματικό διαχωρισμό φορτίων και τη συλλογή τους για παχιά νανοπορώδη στρώματα με την προϋπόθεση ότι το πάχος τους είναι πάνω από 6 nm, όταν έχουμε φτάσει κατά πολύ υψηλότερες τιμές V_{OC} (ή φωτορεύματα) (Σχήμα 4.18).

Στην πράξη, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.18 αντανακλούν μια αλλαγή στην τιμή του καθοριστικού παράγοντα της διαδικασίας ανασυνδυασμού, από τον έλεγχο αντίδρασης στην επιφάνεια των Λ/Φ σε ένα περιορισμένο ποσοστό μεταφοράς στα παχιά φιλμ. Η ισραηλινή εταιρεία Orion Solar χρησιμοποιεί αυτήν την τεχνολογία για την παραγωγή μεγάλων μονάδων DSC που είναι εξοπλισμένα με κυψέλες 15x15 cm.



Σχήμα 4.18 Συσχέτιση μεταξύ του πάχους του στρώματος του TiO_2 και της φωτοτάσης ανοικτού κυκλώματος στις DSC. Τα σύμβολα αντιπροσωπεύουν σύνολα ηλεκτροδίων που έγιναν από τις διάφορες μεθόδους παρασκευής.



Σχήμα 4.19 Σε αντίθεση με τις μονάδες Si, η απόδοση των βαμμένων Φ/Β μονάδων αυξάνει με τη θερμοκρασία.

Εκτός από χαμηλό κόστος (τα υλικά είναι φθηνά και άφθονα: τιτάνια χρησιμοποιείται ευρέως σε οδοντόκρεμες, αντηλιακά και λευκά χρώματα) και την ευκολία της παραγωγής (βλέπε παρακάτω), τα εκπληκτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κυψέλες Si έγκεινται στη διαφάνειά τους, εύκολη δύο όψεων διαμόρφωση (πλεονέκτημα για διάχυτο φως) και ευελιξία (το χρώμα μπορεί να αλλάξει με την επιλογή της χρωστικής ουσίας, συμπεριλαμβανομένων των μη ορατών Φ/Β κυψελών βασισμένων σε σχεδόν υπέρυθρους, IR, ευαισθητοποιητές). Επιπλέον, σε αντίθεση με τις μονάδες Si, οι επιδόσεις των βαμμένων Φ/Β μονάδων στην πραγματικότητα αυξάνονται με τη θερμοκρασία (Σχήμα 4.19)

Ως αποτέλεσμα, υπερτερούν των μονάδων άμορφου Si, παρά τη χαμηλότερη τους απόδοση κατά 5%. Αυτό φάνηκε, για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της έκθεσης EXPO 2005 στην Ιαπωνία όταν το εκθεσιακό σπίτι της Toyota ήταν εξοπλισμένο με μονάδες DSC που αποτελούνταν από Φ/Β μονάδες-τοιίχους. Κάθε μονάδα DSC είχε συνολική επιφάνεια 6.25 m² (2.5m x 2.5m) (Σχήμα 4.20). Η παρακολούθηση της ενέργειας που παράχθηκε αποκάλυψε ότι οι μονάδες DSC έδιναν μια ταχύτερη αύξηση παραγωγής το πρωί και μια πιο αργή πτώση το απόγευμα, λόγω διαφορετικής εξάρτησης από την γωνία ηλιακής ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με μια πρόσφατη έκθεση, μονάδες με σταθερότητα και με απόδοση 10% είναι σίγουρα εφικτός στόχος, με την περίοδο της παραχθείσας ενέργειας προς τον χρόνο αποπληρωμής να είναι σημαντικά μικρότερη από ό, τι άλλες τεχνολογίες Φ/Β. Ως αποδεικτικά στοιχεία για τη χημική και θερμική αντοχή, οι πρόσφατες δοκιμές επιτάχυνσης της γήρανσης έδειξαν ότι το $\leq 8\%$ απόδοσης των DSC διατηρεί το 98% της αρχικής τους απόδοσης πάνω από 1000 h, όταν υποβάλλεται σε θερμικό στρες (80 °C) στο σκοτάδι ή όταν εκτίθεται και σε θερμικό στρες (60 °C) και σε

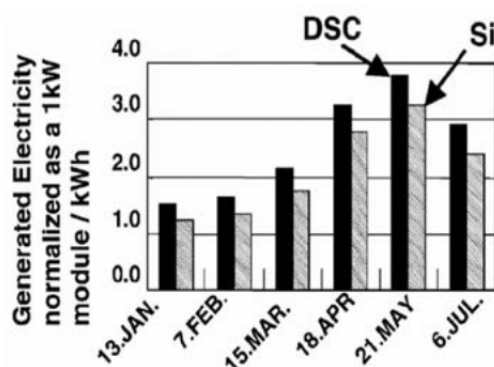
συνεχές φως πάνω από 1000 h. Υπαίθριες δοκιμές (Toyota / Aisin) της πρώτης γενιάς μονάδων DSC έχουν δείξει μείωση μικρότερη από 15% σε τέσσερα χρόνια. Τα αποτελέσματα αυτά εμπνέουν στην επένδυση αυτής της τεχνολογία, και αρκετές εταιρείες εργάζονται προς την κατεύθυνση αυτή.

Έως το 2015, αναμένεται ότι οι εταιρείες θα επιτύχουν αποδοτικότητα μονάδων 10% με προσέγγιση των κριτηρίων για την πιστοποίηση ηλιακών μονάδων για θερμική γήρανση σε 85 °C για 1000 h στο σκοτάδι και 1000 h στο φως του ηλίου σε θερμοκρασία 60 °C. Ένας ρεαλιστικός στόχος είναι αποδοτικότητα της τάξης του 20% σε «ευσταθιστοποιημένες» ηλιακές κυψέλες εργαστηρίου (Πίνακας 4.2).

Έρευνα σχετικά με τις καινοτόμες βαφές, για παράδειγμα, αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις της αποδοτικότητας της κυψέλης. Η Mitsubishi, ένας κορυφαίος κατασκευαστής παραδοσιακών φωτοβολταϊκών μονάδων, έχει αναπτύξει μια εντελώς νέα σειρά από απόρρητες, υψηλής απόδοσης νέες βαφές. Σταδιακά, η εταιρεία καθιστά, τις προσφάτως ανεπτυγμένες χρωστικές ουσίες της, διαθέσιμες στην Ιαπωνική επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με την έρευνα των Φ/Β. Ανάμεσα σε τέτοιες βαφές, στις αρχές της δεκαετίας του 2000 υπήρξε το πρώτο παράδειγμα μιας εξ ολοκλήρου οργανικής χρωστικής ουσίας χωρίς μέταλλα, η ινδολίνη (Indoline C₈H₉N) (Σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.20 Το εκθεσιακό σπίτι της Toyota στο Aichi Expo 2005 ήταν εξοπλισμένο με δύο μεγάλες, κομψές μονάδες DSC των οποίων η απόδοση ξεπέρασε αυτή των μονάδων Si.



Το 2003 η νέα χρωστική, ινδολίνη, είχε απόδοση 8%, ενώ υπό τις ίδιες συνθήκες, οι χρωστικές ουσίες με βάση το ρουθίνιο (Ru), N3 και N719 είχαν 7,89%

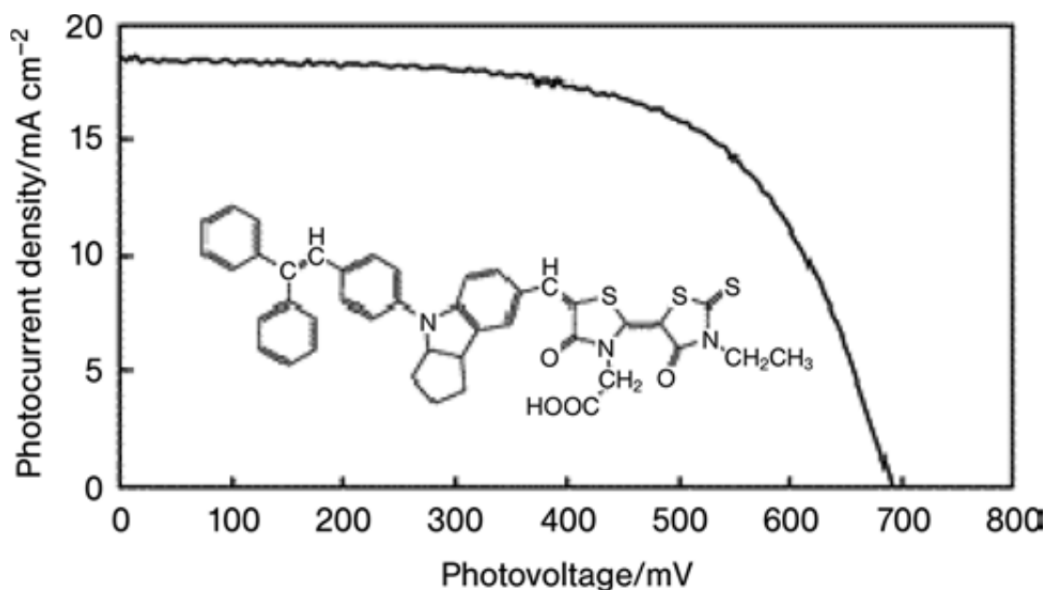
και 8,26% απόδοση, αντίστοιχα. Εκείνη την εποχή, αυτή η τιμή ήταν η υψηλότερη απόδοση που λαμβάνονταν για ηλιακές κυψέλες «ευαισθητοποιημένης» βαφής, που βασίζονταν σε οργανικές βαφές χωρίς μέταλλα απουσία αντι-ανακλαστικού στρώματος.

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά επίδοσης για ηλιακές κυψέλες «ευαισθητοποιημένης» βαφής

Παράμετρος	Κατάσταση (2007)	Μελλοντικός στόχος (2015)
Μέγιστη απόδοση συσκευής	11%	16%
Υποβάθμιση εργαστηριακής κυψέλης	<5% μετά από καταπόνηση στους 80°C για 1000h στο σκοτάδι ή μετά από έκθεση στο φως για 1000h σε 1 sun στους 60°C	<5% μετά από καταπόνηση στους 85°C για 3000h στο σκοτάδι ή μετά από έκθεση στο φως για 3000h σε 1 sun στους 60°C
Απόδοση μονάδας	5-7%	10%
Υποβάθμιση εξωτερικής μονάδας	<15% σε 4 χρόνια	<15% σε 10 χρόνια

Πιο πρόσφατα, η ομάδα Grätzel έχει κάνει αναφορά για μία διπλή κυψέλη 15% αποτελούμενη από μία άνω κυψέλη DSC και μία κάτω κυψέλη Cu (In, Ga). Με το «στοίβαγμα» των δύο κυψελών επιτυγχάνεται απόδοση της τάξης του 15%, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια τιμή απόδοσης από την απόδοση της κάθε κυψέλης ξεχωριστά. Η εταιρία ECN διερευνά την πιθανότητα αντικατάστασης του ηλεκτρολύτη που συνήθως χρησιμοποιείται στις DSC από απλό ηλεκτρόδιο χρυσού. Έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές πρόοδοι στην τεχνολογία των DSC. Ενώ η καλύτερη εργαστηριακή απόδοση κυψέλης, 11%, επιτεύχθηκε από την ομάδα Grätzel στο EPFL (Ελβετία), δεν μπόρεσε να επιτευχθεί από άλλες ομάδες, έχουν παρουσιαστεί πολλές εξελίξεις στην ανάπτυξη μονάδων DSC. Το Ινστιτούτο Fraunhofer ISE (Φράιμπουργκ, Γερμανία) κατασκεύασε εργαστηριακή κυψέλη, διάστασης 1 cm², με πιστοποιημένη απόδοση 10,4%. Παρουσίασαν μια «σφραγισμένη» μονάδα διαστάσεων 30cm x 30cm, που περιείχε έξι διασυνδεδεμένες κυψέλες παρέχοντας 0,8 A στα 4,2 V. Με τη βελτίωση της διαδικασίας εκτύπωσης, οι αποδόσεις του 5% στοχεύουν μονάδες διαστάσεων 60cm x 100cm. Η εταιρία ECN (Πέττεν, Ολλανδία) παρουσίασε πιστοποιημένες αποδόσεις, μονάδων DSC, της τάξης του 8,81% από κυψέλες διάστασης 2,5cm x 2,5cm. Η SHARP (Ιαπωνία), παρουσίασε μια πολύ ωραία μαύρη μονάδα DSC, διαστάσεων 25cm x 25cm με πάχος 0,8cm. Η μονάδα αυτή αποτελείται από 43 κυψέλες, παρέχοντας μέγιστη ισχύ 3W, που αντιστοιχεί σε μια αξιοπρόσεκτη ενεργειακή απόδοση του 4,8%. Έχει καταγραφεί ότι τα περισσότερα από τα άλλα έργα, σχετικά με την κατασκευή Λ/Φ Φ/Β,

χρησιμοποιούν PET (CREST, Λέστερ, Ηνωμένο Βασίλειο) ή υποστρώματα από ανοξειδωτο χάλυβα (HUT, Ελσίνκι, Φινλανδία).



Σχήμα 4.21 καμπύλη φωτορεύματος-τάσης για μονάδες DSC , με χρήση χρωστικών ουσιών χωρίς μέταλλα, που αναπτύχθηκε από τη Mitsubishi στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Η εταιρεία έχει αναπτύξει μία νέα σειρά βαφών για τα DSC και είναι έτοιμη να την εισάγει στην μαζική παραγωγή.

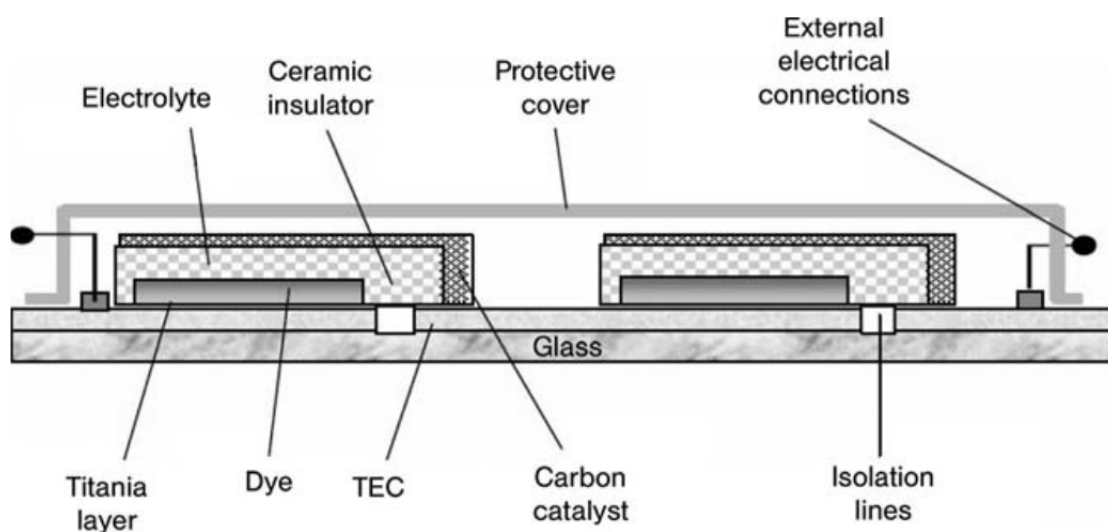
4.4 Ενσωματωμένα κτηριακά Φ/Β με έγχρωμες ηλιακές κυψέλες

Η τεχνολογία DSC είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την ενσωμάτωσή της σε κτίρια, λόγω του κομψού χρώματός της και της διαφανούς επιφάνειάς της. «Ευαίσθητοποιημένες» ηλιακές κυψέλες λειτουργούν βέλτιστα σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και η αποδοτικότητά τους είναι σχετικά ανεξάρτητη από την γωνία του προσπίπτοντος φωτός. Η DSC είναι επίσης ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους που απαιτούν σταθερότητα τάσης και ισχύος για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών χαμηλού φωτισμού.

Το φάσμα των εφαρμογών είναι τεράστιο επειδή ο ευαίσθητοποιητής μπορεί να πάρει οποιοδήποτε χρώμα με όλο το φάσμα των διαφανειών. Αυτό επιτρέπει τη κτιριακή ενσωμάτωση των DSC σε παράθυρα, τοίχους, και στέγες διαφόρων χρωμάτων και διαφάνειας που θα παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια, ακόμα και σε διάχυτο φως ή σε σχετικά χαμηλά επίπεδα φωτισμού πέρα από οποιαδήποτε άλλη λειτουργία που εξυπηρετούν.

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός της μονάδας αποτελείται από δύο φύλλα αγωγίμου γυαλιού, στο ένα φύλλο έχει γίνει απόθεση του ηλεκτροδίου και στο άλλο απόθεση του βοηθητικού ηλεκτροδίου (Σχήμα 4.22).

Τέτοιες προαιρετικά διαφανείς ή ημιδιαφανείς μονάδες είναι ερμητικά κλειστές για να έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής και έτσι καθίστανται κατάλληλες για υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Πράγματι, η μονάδα DSC είναι ιδιαίτερα κατάλληλη στοχεύοντας τις αγορές σε εύκρατα και τροπικά κλίματα, λόγω της καλής της σταθερής θερμοκρασίας και της εξαιρετικής απόδοσής της στο πλαίσιο της έμμεσης ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια νεφελωδών συνθηκών, και όταν είναι, προσωρινά ή μόνιμα, σκιασμένη εν μέρει.



Σχήμα 4.22 Ολοκληρωμένο σχεδιασμός μονάδας για μια τυπική μονάδα DSC. (Εικόνα από Dyesol).

Σε γενικές γραμμές, η παραγωγή των εμπορικών κυψελών είναι μια διαδικασία εννέα βημάτων, που μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί. Ένα διαφανές αγωγίμο γυαλί με επικάλυψη οξειδίου, η οποία γίνεται με επάλειψη εμπορικής πάστας ενός δεδομένου όγκου, 10 mLcm^{-2} διοξειδίου του τιτανίου (Ti-Nanoxide T, για παράδειγμα) για να δώσει ένα στρώμα των $8 \mu\text{m}$.

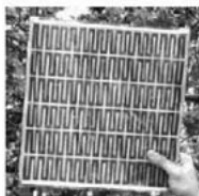
Πραγματοποιείται βέλτιστη θερμοενσωμάτωση με τη θέρμανση του ηλεκτροδίου στους $450 \text{ }^\circ\text{C}$ για περίπου 30 λεπτά, για να «επιτραπεί» στους νανοκρυστάλλους του διοξειδίου του τιτανίου να λιώσουν μαζί μερικώς, εξασφαλίζοντας έτσι την ηλεκτρική επαφή και την μηχανική πρόσφυση στο γυαλί. Η αργή ψύξη εξασφαλίζει την αποφυγή ρωγμών του γυαλιού. Τότε ένας ευαίσθητοποιητής όπως το Ru 535 διαλύεται σε καθαρή αιθανόλη (20mg της χρωστικής ουσίας ανά 100ml διαλύματος) και χρησιμοποιείται για την εμφάνιση του πορώδους ηλεκτροδίου (είτε θερμαίνεται στους $70 \text{ }^\circ\text{C}$ οπότε θα χρειαστεί μόνο 1 με 2 ώρες, είτε σε θερμοκρασία δωματίου όπου θα πάρει περίπου 5 με 10 ώρες, ανάλογα με το πραγματικό πάχος στρώματος διοξειδίου του τιτανίου).

Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο των κυψελών, που παράγονται από την εταιρεία Solaronix για παράδειγμα, γίνεται με εναπόθεση ενός αόρατου στρώματος καταλύτη πλατίνας σε ένα TCO γυαλί. Τα ηλεκτρόδια στη συνέχεια σφραγίζονται με ένα κατάλληλο υλικό στεγανοποίησης (Σχήμα 4.23). Τέλος, η πλήρωση ηλεκτρολυτών γίνεται με την προσθήκη μιας σταγόνας σε μια τρύπα, και αφήνοντάς την να «μπει» μέσα. Μετά τη σφράγιση των κυψελών, ο έλεγχος μιας τέτοιας μονάδας DSC, έχοντας ασημένιες επαφές για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη ηλεκτρική σύνδεση και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες αντίστασης, αποδίδει μια τυπική τάση εξόδου στην περιοχή των 0,6 - 0,7 V σε πλήρες φωτισμό (1000Wm^{-2}) και ρεύματος βραχυκύκλωσης πυκνότητας μεταξύ 8 και 12mAcm^{-2} για ένα πλήρως εμποτισμένο ηλεκτρόδιο πάχους 8 – 10 μm . Το ρεύμα παραμένει σταθερό υπό φωτισμό.

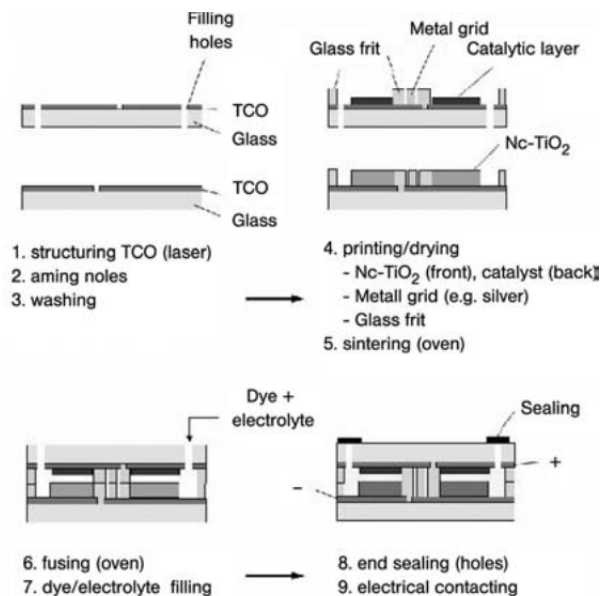
Έχει σχεδιαστεί μια πρότυπη μονάδα DSC με «πλακάκι», στο χρώμα της ώχρας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη πρόσοψη ενός κτιρίου (Σχήμα.4.24) Με άλλα λόγια, μπορεί να αντικαταστήσει τα παραδοσιακά πλακάκια και να λειτουργήσει σαν πραγματικό δομικό υλικό. Αυτά τα «πλακάκια» μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα και να δημιουργήσουν ηλιακά πάνελ των 12 ή 24V. Οι μονάδες ηλιακών πάνελ, διαφόρων μεγεθών για την κάλυψη των απαιτήσεων της υπάρχουσας αγοράς, κυμαίνονται αρχικά σε περίπου 50Wm^{-2} για ένα τυπικό πάνελ $600 \times 900 \text{mm}^2$. Η ονομαστική ισχύς αναμένεται να αυξηθεί κατά 40% μέσα στα επόμενα λίγα χρόνια, καθώς αναπτύσσονται τεχνικές για να μειώσουν τις απώλειες τάσης που οφείλονται στη δομή.

Production of DSC, glass sealed (Fraunhofer ISE)

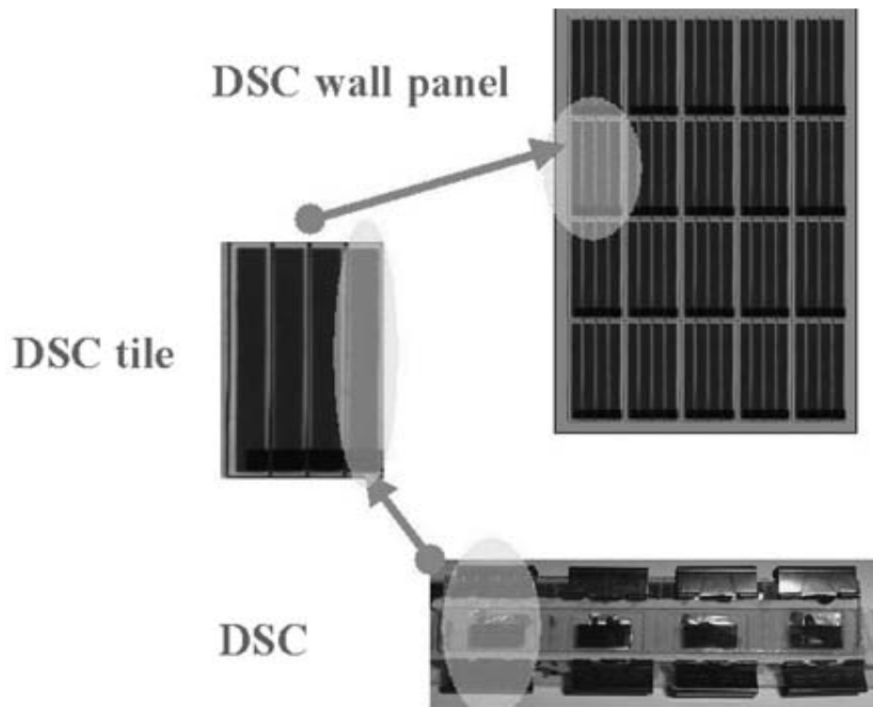
- 9 step approach
- up-scalable



Semi-transparent DSC module, 6-fold serial interconnected, meander type



Σχήμα 4.23 Διατομή συναρμολογημένης «βαμμένης» ηλιακής κυψέλης (Εικόνα από Fraunhofer ISE).



Σχήμα 4.24 Ηλιακά πάνελ τοίχου, κατασκευασμένα από «πλακάκια» DSC που συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα και λειτουργούν ως πραγματικά δομικά στοιχεία. (Φωτογραφία από Dyesol).

Τα ηλιακά πάνελ τοίχου είναι κατασκευασμένα, με ένα «πλαστικοποιημένο» σχεδιασμό, με τα συνδεδεμένα πλακάκια ανάμεσα σε δύο γυάλινες επιφάνειες, πλήρως ενθυλακωμένα σε διαφανές πολυμερές ανθεκτικό κατά της UV ακτινοβολίας. Η ηλεκτρική διασύνδεση μπορεί να είναι συνήθως μέσω ενός μικρού DC-bus σε ένα τοπικό δίκτυο για τη ρύθμιση και τη διανομή ή αναστροφή σε AC.

Η πρώτη παγκόσμια, τέτοιου είδους ένταξη συνέβη στην Αυστραλία χώρα καταγωγής της εταιρείας Dyesol, το 2003 καθώς ο ερευνητικός οργανισμός CSIRO ανέθεσε ένα Φ/Β (**B**uilding-**I**ntegrated **P**hoto**V**oltaic, **BIPV**) DSC σύστημα ενσωμάτωσης σε κτήρια για το ενεργειακό κέντρο CSIRO, στο Νιουκάσλ. Η Dyesol ανέλαβε την κατασκευή των εν λόγω ηλιακών πάνελ τοίχου καθώς και την προμήθεια και εγκατάστασή τους (Σχήμα 4.25).

4.5 Εξατομίκευση της ηλιακής ενέργειας

Σε σύγκριση με όλες τις άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, τα DSC φωτοβολταϊκά προσφέρουν μια μοναδική ευελιξία που οι αρχιτέκτονες και οι μηχανικοί θα τα αξιοποιήσουν για την ανανέωση των προσόψεων των υφιστάμενων

κτιρίων, καθώς και στην κατασκευή νέων ακινήτων. Με άλλα λόγια, θα καταστεί δυνατή η πραγματική εξατομίκευση της ηλιακής ενέργειας.

Στις πλούσιες χώρες, η οικοδομική βιομηχανία «οδηγείται» εξ ολοκλήρου από τις ανάγκες των πελατών. Οι ανάγκες των πελατών προσδιορίζονται σε τοπικό επίπεδο, και στη συνέχεια καλύπτονται αυτές οι ανάγκες από την προσαρμογή του σχεδιασμού και της αρχιτεκτονικής. Αυτό σημαίνει ότι η παραδοσιακή βιομηχανία φωτοβολταϊκών μαζικής παραγωγής τυποποιημένων συσκευών για την παγκόσμια αγορά δεν έχει σχεδόν καμία χρησιμότητα σε αυτό το μεγάλο μέρος της οικοδομικής βιομηχανίας. Οι μονάδες DSC προσφέρουν μια λύση στο πρόβλημα αυτό που επιτρέπει την παραγωγή ημιτελειωμένων προϊόντων που μπορούν να προσαρμοστούν στις εκάστοτε κτιριακές απαιτήσεις (Σχήμα 5.26).



Σχήμα 4.25 Μια από τις προσόψεις του νέου Ενεργειακού Κέντρου CSIRO, στο Νιουκάσλ (Αυστραλία), έγινε με χρήση ηλιακών πάνελ τοίχου της Dyesol. (Φωτογραφία από CSIRO και Dyesol).



Οι μονάδες DSC προσφέρουν ευελιξία, μικρό βάρος, διαφάνεια, απόδοση ισχύος κάτω από συνθήκες χαμηλού φωτισμού και δεν υπόκεινται σε ενεργειακές απώλειες λόγω θερμοκρασίας κατά τις ζεστές ημέρες. Για τις μονάδες DSC με γυάλινα υποστρώματα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το γυαλί είναι μεταξύ των προτιμητέων υλικών για τις σημερινές κατασκευές. Οι DSC μπορούν να ενσωματωθούν σε τροποποιημένα πρότυπα γυάλινων προσόψεων και διαδικασίες που είναι γνωστές στη βιομηχανία γυαλιού, όπως η μεταξοτυπία, όπου θα χρησιμοποιηθούν ευρέως.

Τελικά, όταν διατίθενται στο εμπόριο, οι πλαστικές βαμμένες ηλιακές κυψέλες θα παρέχουν στους κατασκευαστές ένα δομικό στοιχείο εύκαμπτο, λεπτό και ελαφρύ φύλλο Φ/Β που επιτρέπει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με τα δομικά υλικά σε διάφορες αρχιτεκτονικές μορφές, υλοποιώντας έτσι όχι μόνο την συνολική αισθητική και συγγώνευση ανάμεσα στα Φ/Β και την αρχιτεκτονική, αλλά και το κόστος στην αποτελεσματική ενσωμάτωση των Φ/Β.

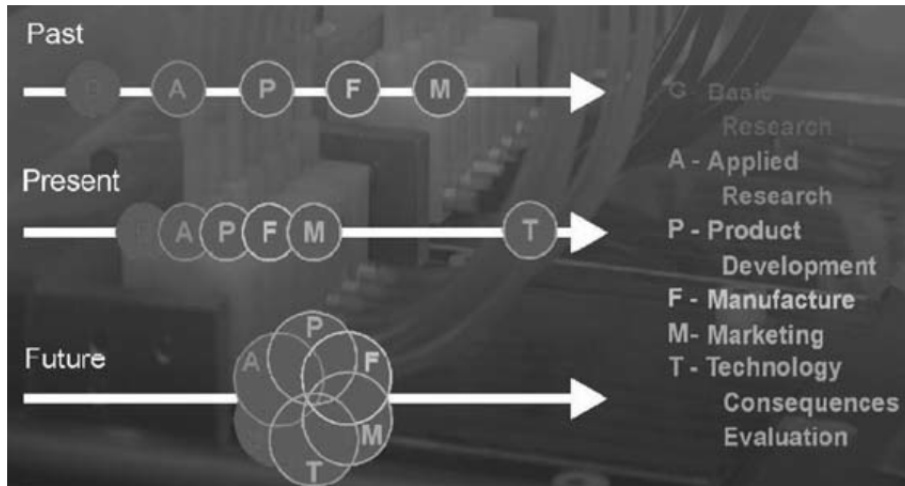


Σχήμα 4.26 Χτισμένο το 2005, αυτό το σπίτι στην Αυστραλία χρησιμοποιεί μονάδες DSC της Dyesol. (Φωτογραφία από Dyesol).

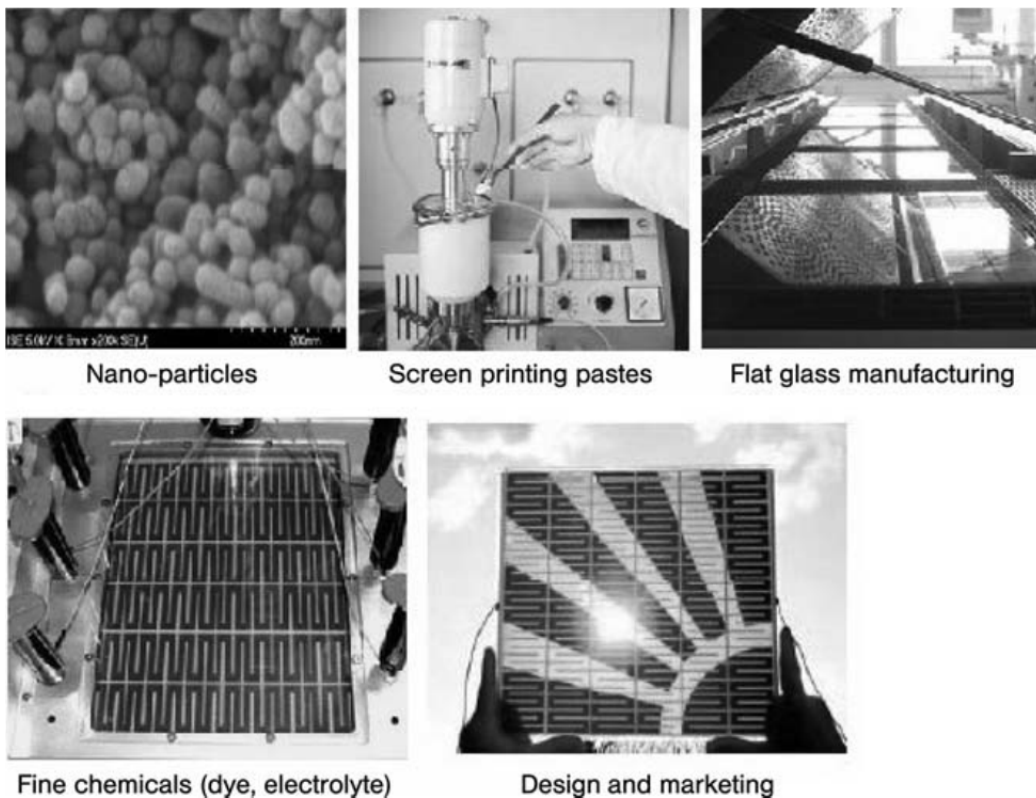
Σε γενικές γραμμές, όπως δήλωσε και ο Dr. Ingo B. Hagemann τον στο 2^ο Διεθνές Συνέδριο για την εκβιομηχάνιση των DSC στο Σεν Γκάλεν της Ελβετίας (11-13 Σεπτέμβρη 2007), εξελίσσεται η τεχνολογία από το πρόγραμμα ανάπτυξης των παλαιών, σειριακών Φ/Β προϊόντων σε εκείνη την τεχνολογία κατά την οποία διεξάγεται από κοινού η βασική και εφαρμοσμένη έρευνα με χρήση πληροφοριών που αντλείται από την κατασκευή, την εμπορία και την κοινωνική αξιολόγηση της τεχνολογίας (Σχήμα 4.27).

Ως εκ τούτου, η αλυσίδα προστιθέμενης αξίας γίνεται ένα, στην οποία ο σχεδιασμός και το μάρκετινγκ μπαίνουν στην αλυσίδα από την πολύ αρχή της ανάπτυξης του προϊόντος, εμπλουτίζοντας την αξία του με μοναδικά χαρακτηριστικά όπως η εκτύπωση διακοσμητικών στοιχείων (Σχήμα 5.28).

Ακριβώς αυτό κάνει το Γερμανικό Ινστιτούτο Fraunhofer επί του παρόντος, παίρνοντας συνεντεύξεις από αρχιτέκτονες στον τομέα της δημιουργίας ολοκληρωμένων Φ/Β και μεταφέροντας τις απαιτήσεις για την παραγωγή δύο πρωτότυπων για την ένταξη Φ/Β στις προσόψεις.



Σχήμα 4.27 Η εξέλιξη της τεχνολογίας από το πρόγραμμα ανάπτυξης των παλαιών, σειριακών Φ/Β προϊόντων σε εκείνη την τεχνολογία κατά την οποία διεξάγεται από κοινού η βασική και εφαρμοσμένη έρευνα με χρήση πληροφοριών που αντλείται από την κατασκευή, την εμπορία και την κοινωνική αξιολόγηση της τεχνολογίας. (Πηγή: Ingo B. Hagemann).



Σχήμα 4.28 Σχεδιασμός και μάρκετινγκ μπαίνουν στην αλυσίδα αξίας των DSC από την πολύ αρχή της ανάπτυξης του προϊόντος. (Φωτογραφία Fraunhofer ISE).

5. Αναδυόμενες Τεχνολογίες

5.1 Το ηλιακό παράδοξο

Η μοναδική πηγή ενέργειας που έχουμε εν αφθονία είναι η ηλιακή ενέργεια. Απλά δεν έχουν αρκετή αιολική ενέργεια, ενέργεια κυμάτων, γεωθερμική ενέργεια, πυρηνική ενέργεια ή η βιομάζα για να μειώσουμε τα επίπεδα του CO₂ και να δημιουργήσουμε αρκετή ενέργεια σε διπλάσια ποσότητα μόνον από την απαιτούμενη για να τροφοδοτηθεί κάθε άνθρωπος μέχρι το 2050. Από την άλλη πλευρά, η παραγωγή ηλιακής ενέργειας θα είναι ένα σημαντικό μέσο για τον περιορισμό των κινδύνων της κλιματικής αλλαγής μόνο όταν μπορεί να ανταγωνιστεί, σε θέματα κόστους, άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου ακόμη και ένα μικρό επιπλέον οριακό κόστος μπορεί να αποτρέψει τους ανθρώπους και τις επιχειρήσεις (ακόμα και τις πιο εύπορες από αυτές) από τη μετάβαση σε ανανεώσιμες ενεργειακές επιλογές.

Μια ροή ισχύος 120000 TW κατακλύζει τη Γη, καθώς τα φωτόνια από τον ήλιο φτάνουν στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια στη γη και τη θάλασσα. Καλύπτοντας μόλις το 0,16% της επιφάνειας της γης με Φ/Β συστήματα μέσης απόδοσης 10% θα παρείχε ενέργεια 20 TW, σχεδόν δύο φορές το ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Με άλλα λόγια, περίπου 1 / 10000 του ηλιακού φωτός που φθάνει στη Γη θα ήταν αρκετό για να τροφοδοτήσει ολόκληρο τον πλανήτη με ενέργεια. Ωστόσο, η ηλιακή ενέργεια είναι διάχυτη (περίπου 170Wm⁻²) και διαλείπουσα, έτσι η μετατροπή σε χρήσιμες μορφές ενέργειας θα πρέπει να περιλαμβάνει τη συγκέντρωση και την αποθήκευση.

Η κατανόηση της διαδικασίας φωτοσύνθεσης των φυτών προχωρεί με ταχείς ρυθμούς και, μια μέρα, αυτές οι χημικές διεργασίες θα κατανοηθούν πλήρως από την βιομηχανία για την παραγωγή υδρογόνου, ένα εξαιρετικό χημικό καύσιμο, ιδιαίτερα κατάλληλο για να τροφοδοτήσουν κυψέλες καυσίμου που με τη σειρά τους, παράγουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας με απόδοση 80% (σε σύγκριση με την απόδοση του 20% του κινητήρα εσωτερικής καύσης).

Οι μεγάλες προκλήσεις για τους χημικούς σήμερα είναι δύο: (i) να δημιουργήσουν μια τεχνητή διαδικασία φωτοσύνθεσης για την τεχνητή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε καύσιμα και (ii) να εφεύρουν νέες ηλιακές κυψέλες ικανές να επιτύχουν φωτοβολταϊκή μετατροπή υψηλής απόδοσης. Στη συνέχεια, ο πολιτισμός θα συνεχιστεί με βάση την ηλιακή ενέργεια, όπως σαφώς προβλέφθηκε από τον Giacomo Ciamician, Ιταλός φωτοχημικός με Αρμένικη καταγωγή, 9 φορές υποψήφιος για το βραβείο Νόμπελ χημείας, όπου θεωρείται ο πατέρας του ηλιακού πάνελ, πριν από εκατό χρόνια (Σχήμα 5.1), στην περίφημη διάλεξη του «Η Φωτοχημεία του Μέλλοντος» στη Νέα Υόρκη το 1912.



Σχήμα 5.1 «Ο μαύρος και αγχώδης πολιτισμός μας που βασίζεται στον άνθρακα, - όπως ήδη προέβλεψε ο χημικός G. Ciamician από το 1912- θα πρέπει να αντικατασταθεί από έναν πιο ήσυχο πολιτισμό που να βασίζεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας»

«Μέχρι στιγμής, ο ανθρώπινος πολιτισμός έχει κάνει χρήση σχεδόν αποκλειστικά των ορυκτών καυσίμων. Δεν θα ήταν επωφελές να κάνουμε καλύτερη χρήση της ενέργειας από την ακτινοβολία;. . . Η ηλιακή ενέργεια δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της γης. Υπάρχουν προνομιούχες περιοχές, και άλλες που είναι λιγότερο ευνοημένες από το κλίμα. Οι πρώτες θα είναι οι ευημερούσες, αν καταστούν ικανές να χρησιμοποιήσουν την ενέργεια του ήλιου. Οι τροπικές χώρες θα πρέπει να κατακτηθούν από τον πολιτισμό ο οποίος με αυτόν τον τρόπο θα επιστρέψει στην γενέτειρα του. . . Αν ο μαύρος και αγχώδης πολιτισμός μας, που βασίζεται στον άνθρακα, θα πρέπει να αντικατασταθεί από έναν πιο ήσυχο πολιτισμό που θα βασίζεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, αυτό δεν θα είναι επιβλαβές για την πρόοδο και για την ανθρώπινη ευτυχία.»

Τα φωτοβολταϊκά, από την άλλη πλευρά, ήδη, από μόνα τους, έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν την πυρηνική ενέργεια, στο απαιτούμενο βάθος

χρόνου, ακόμη και σε βόρειες χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο. Για παράδειγμα, το Η.Β επί του παρόντος παράγει 12 GW ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περίπου το ένα έκτο της συνολικής παραγωγής της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για το ίδιο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς ρύπανση, που θα παράγει η Γερμανία μέσω φωτοβολταϊκών έως το 2012, αν συνεχίσει να επεκτείνει το πρόγραμμα ηλιακής ενέργειας με τον τρέχοντα ρυθμό.

Το Ηνωμένο Βασίλειο έχει ένα παρόμοιο προφίλ ηλιοφάνειας όπως η Γερμανία και θα μπορούσε να παράγει 12 GW ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2023 εάν η παραγωγή αυξηθεί κατά 40% ανά έτος, λιγότερο από το παγκόσμιο ποσοστό, που είναι της τάξης του 57% το 2004.

Οι πιο συνήθως, πρώτης γενιάς, Φ/Β κυψέλες αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, έχουν απόδοση γύρω στο 15-17%, διάρκειας ζωής περίπου 30 ετών και ένα κόστος για δικτυακή ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 0,20 έως 0,80 \$ / kWh. Ειδικότερα, τυπικό κόστος 0,20 – 0,40 \$ / kWh για χαμηλά γεωγραφικά πλάτη με ηλιακή ακτινοβολία 2500 kWh/m²/έτος, 0,30 – 0,50 \$ / kWh για 1500 kWh/m²/έτος (τυπικό κόστος Νότιας Ευρώπης) και 0,50 – 0,80 \$ για 1000kWh/m²/έτος (για υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη).

Τα κόστη αυτά θα πρέπει να συγκριθούν με την προμήθεια του ηλεκτρικού δικτύου από τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 0,03 \$ (εκτός των ωρών αιχμής, αναπτυγμένης χώρας) και 0,80 \$ / kWh (ηλεκτροδότηση της υπαίθρου). Ο χρόνος αποπληρωμής της ενέργειας από ένα ηλιακό κύτταρο είναι συνεπώς της τάξης των 2-4 ετών και κατά τη διάρκεια της ζωής μιας κυψέλης μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, αξίας περίπου 10 φορές το κόστος παραγωγής της. Αθροιστικά, το σύνολο της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 7.7 GW το 2007. Η ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια είναι ήδη οικονομικά ανταγωνιστική προς την ενέργεια από ορυκτά και πυρηνικά, λαμβάνοντας υπόψη τους εξωτερικούς παράγοντες.

Όμως, παραδόξως, η μεγαλύτερη αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, το κύριο αέριο που προκαλεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου που συνδέεται με την πρόσφατη υπερθέρμανση του πλανήτη, προέρχεται από την γρήγορα αυξανόμενη χρήση του άνθρακα της Κίνας για να τροφοδοτήσει την βιομηχανική της οικονομία, η οποία επίσης, παράγει φωτοβολταϊκά πάνελ προς πώληση στο εξωτερικό.

Για παράδειγμα, μία από τις εταιρείες αυτές που εισήχθη με επιτυχία στο χρηματιστήριο της Νέας Υόρκης, αμέσως μετά την ίδρυσή της το 2001 έως και σήμερα, είναι η Suntech Power Holdings (Σχήμα 6.2) η οποία έχει αναρριχηθεί στην πέμπτη θέση των μεγαλύτερων κατασκευαστών, παγκοσμίως, ηλιακών πάνελ, πίσω από την Sharp Japan, Q-Cells Germany, Kyocera Japan και BP Solar UK.

Οι μονάδες Φ/Β της Suntech Power Holdings, έχουν απόδοση της τάξης του 15,5 με 16,5%, που την καθιστά την κορυφαία στον κλάδο με αυτό το ποσοστό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ο μέσος όρος του κλάδου είναι

15%. Η Suntech πειραματίζεται με μια νέα σειρά που έχει απόδοση 18%, και στοχεύει στο 20% έως το 2012. Ωστόσο, οι κύριες αγορές της Suntech είναι η Γερμανία, η Ιαπωνία και η Ισπανία, οι οποίες επιδοτούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ η Κίνα αντιπροσώπευε μόλις το 10% των πωλήσεων του 2006 που ανήλθε σε \$599.000.000,00. Στην πράξη, η τοπική μείωση των εκπομπών CO₂ μέσω της ηλιακής ενέργειας στο δυτικό κόσμο βασίζεται στην παραγωγή των κυψελών πυριτίου, μέσω καύσης άνθρακα, στα προάστια της Σαγκάης.

Από τις αρχές του 2007, η Κινεζική νομοθεσία απαιτεί οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα εργοστάσια να παράγουν τουλάχιστον το 10% της ενέργειάς τους, από ανανεώσιμες πηγές έως το 2012, αλλά δεν υπάρχει σχεδόν καμία ελπίδα ότι η παραγωγή ηλιακής ενέργειας θα είναι ένα σημαντικό μέσο για τον περιορισμό των κινδύνων του κλίματος αν το κόστος δεν μειωθεί για να γίνει ανταγωνιστικό με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες.



Σχήμα 5.2 Οι εργαζόμενοι χειρίζονται τις ηλιακές κυψέλες για την παραγωγή ηλιακών πάνελ στο εργοστάσιο της Suntech Power στο Wuxi, Κίνα.

Οι επικριτές της ενέργειας από ηλιακά πάνελ υποστηρίζουν ότι ακριβώς για να αποτρέψουν λιγότερο από το ένα δέκατο της προβλεπόμενης αύξησης της καύσης του άνθρακα μέχρι το 2050, θα χρειαστούν 200 προγράμματα σαν αυτό της πολιτείας της Καλιφόρνια, “*Million Solar Roofs – MSR*²³”. Ωστόσο, αξιόπιστα και μεγαλεπήβολα σχέδια που αποσκοπούν στην τεράστιας κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία στην πραγματικότητα υπάρχουν,

²³ Ένα επιδοτούμενο πρόγραμμα–πρωτοβουλία που δρομολογήθηκε από την κυβέρνηση της Καλιφόρνια στόχος του οποίου ήταν η τοποθέτηση ενός εκατομμυρίου πάνελ στις οροφές των κτιρίων.

βασίζονται εξ' ολοκλήρου στις υπάρχουσες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών υποθέτοντας σταδιακή βελτίωση της αποτελεσματικότητας των σημερινών ηλιακών κυψελών.

Τέτοιες σταδιακές βελτιώσεις έχουν αναφερθεί με αυξανόμενη συχνότητα. Για παράδειγμα, οι πρόσφατες προσπάθειες για την αντιμετώπιση του ζητήματος της αποδοτικότητας των ηλιακών κυψελών περιλαμβάνουν μία σημαντική ανακάλυψη από την Sanyo τον Ιούνιο του 2007, η οποία επέτρεψε στην εταιρεία να σπάσει το δικό της ρεκόρ και να πετύχει, σε παγκόσμιο επίπεδο, την υψηλότερη απόδοση μετατροπής ενέργειας, σε πρακτικό μέγεθος ηλιακών κυψελών κρυσταλλικού πυριτίου, φτάνοντας απόδοση της τάξης του 22%. Πιο πρόσφατα, ο οργανισμός "Global Warming Solutions" ανακοίνωσε την ανάπτυξη νέων ηλιακών τεχνολογιών ενεργειακής μετατροπής που θα βασίζονται σε μια ειδική επίστρωση που μπορεί να εφαρμοστεί στις υπάρχουσες ηλιακές κυψέλες.

Παρομοίως, διαφορετικοί τύποι ηλιακών κυψελών Λ/Φ έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα και σύντομα θα ενσωματωθούν στις υφιστάμενες ηλιακές κυψέλες Λ/Φ για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητά τους. Οι οργανικές κυψέλες σχήματος V αυξάνουν την αποδοτικότητα των ηλιακών κυψελών κατά 52% ενισχύοντας την δυνατότητα του φωτός να απορροφηθεί. Αντί της επίπεδης διαμόρφωσης των περισσότερων οργανικών ηλιακών κυψελών, στην οποία όταν το φως χτυπά υπάρχει μόνο μία ευκαιρία να αναπηδήσει, οι ηλιακές κυψέλες σχήματος V δημιουργούν ένα περιβάλλον στο οποίο το φως μπορεί να διαδοθεί ολόγυρα.

Ωστόσο, ο περιορισμός της έρευνας Φ/Β σε αυτές τις σειρές των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών μπορεί να είναι επικίνδυνος για δύο λόγους: Πρώτον, οι μονάδες επίπεδης πλάκας έχουν περιορισμένη απόδοση η οποία δεν υπερβαίνει το 25%. Δεύτερον, η βιομηχανία Φ/Β θα χάσει ευκαιρίες τις οποίες προσφέρουν οι ριζικές αλλαγές στην τεχνολογία.

Το τελικό βήμα για την ανάπτυξη προσιτών τεχνολογιών ηλιακών κυψελών με κόστος κάτω από 0.5 € / Wp είναι η ανάπτυξη ανατρεπτικών, μετεξελικτικών επιστημονικών ανακαλύψεων. Αντί της κατασκευής της πρώτης γενιάς υψηλής ποιότητας, ελαχίστων ελαττωμάτων, μονοκρυσταλλικών Φ/Β μονάδων που έχουν υψηλή απόδοση που πλησιάζει την περιοριστική απόδοση μονάδων μονής ζώνης ενεργειακού κενού, αλλά να χρησιμοποιούν ενεργοβόρες και χρονοβόρες τεχνικές, η προσέγγιση τρίτης γενιάς Φ/Β στοχεύει να χρησιμοποιήσει Λ/Φ, μεθόδους εναπόθεσης δεύτερης γενιάς. Η ιδέα είναι να το κάνει αυτό με μόνο μια μικρή αύξηση σε πραγματικές δαπάνες και ως εκ τούτου να μειώσει το κόστος ανά Wp.

Επίσης, από κοινού με τεχνολογίες Λ/Φ, οι οποίες θα χρησιμοποιούν υλικά που θα είναι και μη τοξικά και άφθονα. Έτσι, αυτές οι τεχνολογίες τρίτης γενιάς θα είναι συμβατές με μεγάλης κλίμακας εφαρμογές των Φ/Β.

5.2 Κβαντικά Φρεάτια Ηλιακών Κυψελών

Τα τελευταία χρόνια, η παγκόσμια παραγωγή ηλιακών κυψελών αυξάνεται κατά 47% κάθε χρόνο. Η ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς φωτοβολταϊκών έχει οδηγήσει στην έλλειψη πρώτης ύλης (πυρίτιο), έτσι οι κυψέλες που βασίζονται σε διαφορετικό σύστημα υλικών και τεχνολογία παραγωγής, όπως οι ηλιακές κυψέλες ισόρροπης τάσης *κβαντικών φρεατίων*²⁴ (**SB-QWSC**) είναι σημαντική προκειμένου να διατηρηθεί αυτή η ανάπτυξη.

Η πρώτη γενιά αυτών των νέων κβαντικών φρεατίων Φ/Β κυψελών λειτουργούν με απόδοση 27%, η οποία είναι περίπου διπλάσια της τρέχουσας απόδοσης Φ/Β κυψελών Si και κοντά στην απόδοση ρεκόρ, της κυψέλης μονής δομής, 27,8%. Επιπλέον, βασίζονται σε τεχνολογίες παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για τους ενισχυτές κινητών τηλεφώνων, έτσι η δυνατότητα για την παραγωγή τους σε μεγάλη κλίμακα είναι ήδη σε ισχύ.

Πράγματι, οι SB-QWSC κατασκευάζονται από κράματα με βάση το GaAs (GaAsP / GaInAs) και καθιερώθηκαν ως ένας τρόπος για να επεκταθεί η φασματική περιοχή των κυψελών GaAs υψηλής απόδοσης, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία του κβαντικού φρεατίου (**QW**) στην οποία βασίζεται σύγχρονες συσκευές επικοινωνίας, όπως το λείζερ, LED και οι ενισχυτές στα κινητά τηλέφωνα.

Επιπλέον, η σχετικά φθηνή οπτική, όπως κάτοπτρα ή φακοί εστιάζουν το φως του ήλιου από μια ευρεία περιοχή συλλογής πάνω σε μια πολύ μικρότερη περιοχή των ενεργού ημιαγωγίου Φ/Β υλικού κυψέλης. Αυτό μειώνει την επιφάνεια των ακριβών υλικών της Φ/Β κυψέλης κατά περίπου 1 / 500 οδηγώντας σε σημαντική μείωση της τιμής. Πράγματι, το ημιαγωγίο Φ/Β υλικό κυριαρχεί στο κόστος αυτών των ηλιακών Φ/Β συστημάτων, και μειώνοντας την ποσότητα του Φ/Β υλικού που απαιτείται για να συλλεχθεί μια δεδομένη ποσότητα ηλιακού φωτός οδηγεί σε σημαντικά τόσο σε χαμηλότερο κόστος του συστήματος όσο και σε κόστος ανά Watt παραγωγής.

Τα QW δίνουν στην κυψέλη μία ευρύτερη φασματική περιοχή χωρίς να δημιουργούν διαταραχές στη δομή των κρυστάλλων (οι συνθέσεις του κράματος και το πάχος του φρεατίου και του *εύρους φραγμού δυναμικού*²⁵ ρυθμίζονται ώστε να ελαχιστοποιήσουν το σχηματισμό διαταραχών στη δομή των κρυστάλλων). Και τα δύο χαρακτηριστικά δίνουν στις SB-QWSC μία σειρά από πλεονεκτήματα σε εφαρμογές συλλέκτη σε σχέση με τις δαπανηρές διπλής ή τριπλής δομής κυψέλες GaAs, οι οποίες είχαν σχεδιαστεί για χρήση στο διάστημα.

²⁴ Ένα λεπτό στρώμα υλικού (συνήθως πάχους μεταξύ 1 και 10 nm) εντός του οποίου η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μικρότερη απ' ότι έξω από το στρώμα, έτσι ώστε η κίνηση των ηλεκτρονίων να είναι κβαντισμένη και να γίνεται κάθετα προς το στρώμα.

²⁵ Το ελάχιστο δυναμικό που απαιτείται για να υπερπηδηθεί η ζώνη απογύμνωσης ή ζώνη ενεργειακού κενού από τα ηλεκτρόνια.

Η απουσία διαταραχών σημαίνει ότι οι SB-QWSC θα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μεγαλύτερης απόδοσης κυψέλες πολλαπλής δομής. Κατά την ίδια απόδοση οι SB-QWSC θα ξεπεράσουν μία συμβατική συνδεσμολογία διαδοχικών κυψελών, επειδή δεν απαιτείται μια *δομή σήραγγας*²⁶ για τη σύνδεση των κυψελών. Η ευρύτερη φασματική περιοχή των κυψελών QW έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντικά περισσότερη «συλλογή» ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια ενός έτους λόγω της εποχικής και καθημερινής φασματικής μεταβολής του φωτός του ήλιου.

Συνολικά, τα πλεονεκτήματα αυτά της «τρίτης γενιάς» κυψελών GaAs και άλλων ημιαγωγικών υλικών της ομάδας *III-V*²⁷ που χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυψέλες Si για επίπεδα Φ/Β πάνελ παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Η ζώνη ενεργειακού κενού των SB-QWSC (στο σχήμα 5.3) αποτελείται από μία δίοδο τύπου p-i-n με την i-περιοχή να περιέχει έναν αριθμό (μέχρι 65) QW πλάτους περίπου 7nm από $In_xGa_{1-x}As$ συμπιεσμένης τάσης να εισάγεται σε περιοχές φράγματος $GaAs_{1-y}P_y$ ελαστικής τάσης. Η κρυσταλλική δομή, σχήμα 5.4, αναπτύσσεται επιταξιακά, παράγοντας ένα κρίσιμο πάχος φρεατίου άνω των 1 μm.

Όταν η SB-QWSC ενσωματώνεται σε μία κυψέλη διπλής επαφής, η ευρύτερη φασματική περιοχή οδηγεί σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα των κυψελών. Αυτή η βελτίωση είναι τέτοια που σε ένα μέρος όπως η Μαδρίτη, όπου υπάρχει μια εγγυημένη τιμή αποζημίωσης για την τροφοδοσία του ηλεκτρικού δικτύου μέσω Φ/Β, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι τόσο μεγάλη όσο το κεφαλαιακό κόστος του συστήματος στην αναμενόμενη 25χρονη διάρκεια ζωής του.

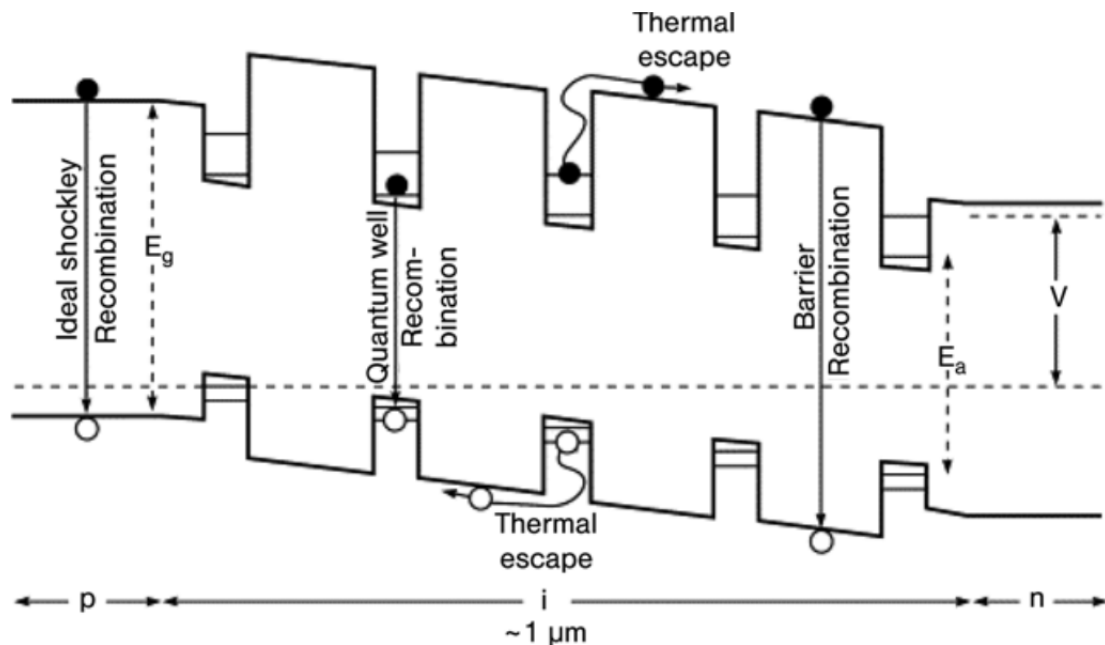
Οι SB-QWSC παρουσιάζουν, επίσης, ένα φαινόμενο γνωστό ως *ανακύκλωση φωτονίου*²⁸, όταν λειτουργούν σε υψηλή συγκέντρωση.

²⁶ Είναι μια διπολική ηλεκτρονική συσκευή που έχει ένα εξαιρετικά μικρό εύρος φραγμού δυναμικού στην ροή ηλεκτρονίων, έτσι ώστε το χαρακτηριστικό μεταφοράς (καμπύλη ρεύμα-τάση) διέπεται πρωτίστως από την διεργασία κβαντικής μηχανικής διείσδυσης σήραγγας η οποία επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να διαπεράσουν το φράγμα. Στις ΦΒ κυψέλες πολλαπλών επαφών, οι επαφές σήραγγας σχηματίζουν την σύνδεση μεταξύ συνεχόμενων στρωμάτων ηλιακών κυψελών. Λειτουργούν ως μια ωμική ηλεκτρική επαφή στη μέση μια ημιαγωγικής συσκευής.

²⁷ Μερικά χαρακτηριστικά ημιαγωγικά υλικά αυτής της ομάδας είναι: AlSb, GaP, GaAs, GaSb, InP, InSb.

²⁸ Όταν τα φωτόνια από το φως του ήλιου απορροφώνται σε ένα ΦΒ υλικό θα κλωστήσουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και θα αφήσουν πίσω τις οπές. Τα ηλεκτρόνια που περνούν έξω από την κυψέλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρική ενέργεια, αλλά πολλά από αυτά χάνονται στους ημιαγωγούς όταν επανασυνδέονται με μια οπή για να παράξουν είτε αχρείαση θερμότητα είτε ένα νέο φωτόνιο. Με προσεκτική "καλλιέργεια" ενός υψηλής ποιότητας ενιαίου κρυστάλλου (π.χ. αρσενικούχο γάλλιο) θα μπορούσαμε να εξασφαλίσουμε ότι περισσότερο από το 99% των επανασυνδέσεων θα οδηγήσει σε νέα φωτόνια. Τα φωτόνια θα μπορούσαν στη συνέχεια να δημιουργήσουν ένα νέο ζεύγος ηλεκτρόνιο-οπή και να δώσουν στο ηλεκτρόνιο άλλη μια ευκαιρία για να "συλληφθούν" ως ηλεκτρική ενέργεια.

Όταν το κάτοπτρο, που είναι γνωστό ως ανακλαστήρας κατανομής Bragg (DBR)²⁹ αναπτύσσεται υπό τα κβαντικά φρεάτια, κάποια από τα «χαμένα» φωτόνια αντανακλώνται πίσω στα QW. Εκεί απορροφώνται, όπως το προσπίπτον φως του ήλιου, προστίθενται στο ρεύμα και έτσι ενισχύουν την αποδοτικότητα. Το μέγιστο κέρδος αποδοτικότητας που θα μπορούσε να επιτευχθεί είναι περίπου 4%, το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή, παρέχοντας εξοικονόμηση παρόμοια με το κόστος του συστήματος σε μια ηλιόλουστη τοποθεσία με μια εγγυημένη τιμή για Φ/B ηλεκτρική ενέργεια.



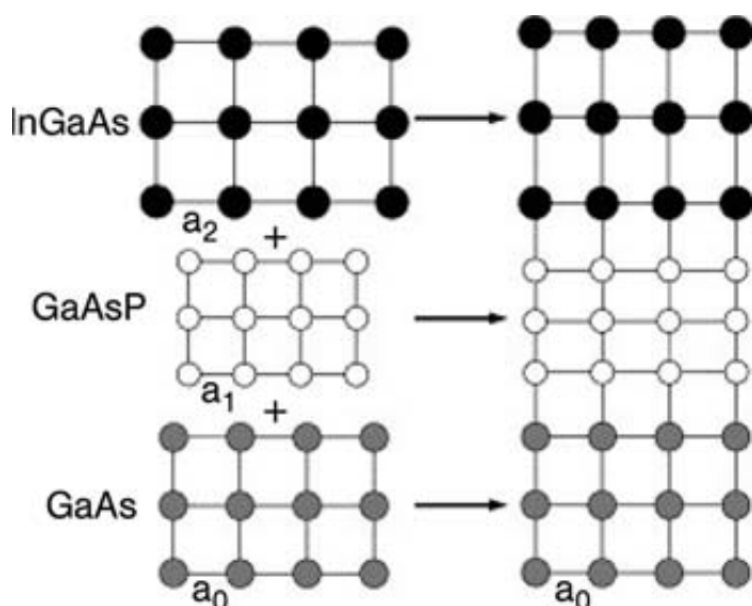
Σχήμα 5.3 Σχηματική αναπαράσταση μιας SB-QWSC με φρεάτια $In_xGa_{1-x}As$ συμπίεσμής τάσης και φράγματα $GaAs_{1-y}P_y$ ελαστικής τάσης υψηλότερο από το μεγαλύτερο μέρος $GaAs$ σε p και n περιοχές.

Η χρήση των βαθύτερων QW, διαφορετικών DBR και διαφανών υποστρωμάτων για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και στα δύο είδη κυψελών (μονής δομής, διπλής δομής) αποτελεί αντικείμενο έρευνας, και θα οδηγήσει στα πρώτα Φ/B προϊόντα της εταιρείας QuantaSol, που ιδρύθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο,

²⁹ Ένας ανακλαστήρας κατανομής Bragg (DBR) είναι ένας ανακλαστήρας που χρησιμοποιείται σε κυματοδηγούς όπως οι οπτικές ίνες. Πρόκειται για μια δομή που αποτελείται από πολλαπλές στρώσεις, εναλλάξ, υλικών με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης, είτε με περιοδική μεταβολή ορισμένων χαρακτηριστικών (όπως το ύψος) ενός διηλεκτρικού κυματοδηγού, με αποτέλεσμα την περιοδική μεταβολή του πραγματικού δείκτη διάθλασης του οδηγού. Κάθε όριο στρώματος προκαλεί μερική αντανάκλαση ενός οπτικού κύματος. Για τα κύματα των οποίων το μήκος κύματος είναι περίπου με τέσσερις φορές το οπτικό πάχος των στρωμάτων, οι πολλές αντανακλάσεις συνδυάζονται με την εποικοδομητική παρέμβαση, και τα στρώματα ενεργούν ως ένας υψηλής ποιότητας ανακλαστήρας.

να εμπορευματοποιήσει ηλιακές μονάδες με βάση αυτές τις καινοτόμες κυψέλες (Σχήμα 5.5).

Η εταιρεία σχεδιάζει να κατασκευάσει μονής και πολλαπλής δομής κυψέλες ηλιακής συγκέντρωσης με επίπεδα απόδοσης έως και 40%, παρέχοντας τις πρώτες κυψέλες για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα συγκέντρωσης (CPV) για την ταχέως αυξανόμενη αγοράς ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής κοινής χρήσης. Σήμερα η επιχείρηση, στην οποία το 2007 η εταιρεία επενδύσεων Imperial Innovations Group επένδυσε £1.350.000 φθάνοντας το 24% των μετοχών, παράγει πρωτότυπα κυψελών κβαντικών φρεατίων.



Σχήμα 5.4 Σχηματική αναπαράσταση της κρυσταλλικής δομής ηλιακών κυψελών κβαντικού φρεατίου ισόροπης τάσης.



Σχήμα 5.5 Συγκροτήθηκε το 2006, η βρετανική εταιρεία QuantaSol είναι έτοιμη να εμπορευματοποιήσει ηλιακές κυψέλες QW που αναπτύσσονται στο τμήμα φυσικής του London's Imperial College.

Πίνακας 5.1 Ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα των SB-QWPV

Χαρακτηριστικά	Πλεονέκτημα	Τεχνικές λεπτομέρειες
Συντονισιμες φασματικές ιδιότητες	Υψηλότερη συνολική απόδοση	<p>Η φασματική απόδοση μιας κυψέλης SB-QWPV μπορεί να συντονιστεί για την μεγιστοποίηση της απόδοσης μετατροπής ενέργειας για ένα ευρύ φάσμα ακτινοβολιών απλά με την μεταβολή της σύνθεσης και του πάχους των ημιαγωγικών νανοστρωμάτων της κατηγορίας III-V στην ενεργή περιοχή της ηλιακής κυψέλης. Ως εκ τούτου: (i) τα SB-QWPV μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να μεγιστοποιήσουν την αποτελεσματικότητα μιας κυψέλης μονής δομής υπό τυπικά ηλιακά φάσματα, (ii) τα SB-QWPV παρέχουν μια πολύ αποτελεσματική λύση για την σημαντική ενίσχυση της αποδοτικότητας κυψελών πολλαπλής δομής σε σχέση με τρέχουσες εμπορικές λύσεις (όπως GaInP/GaAs ή GaInP/GaAs/Ge.)</p> <p>Η δομική σταθερότητα των κυψελών SB-QWPV είναι διασφαλισμένη με την ύπαρξη αντίθετης πίεσης κβαντικών φρεατίων και φραγμών που εμποδίζουν οποιαδήποτε εκτεταμένα ελαττώματα στον κρύσταλλο να αποκτήσουν υπόσταση και να διαδοθούν στη ενεργό περιοχή της κυψέλης. Σε σύγκριση με ένα SB-QWPV, οποιαδήποτε υλικό που έχει την ίδια βέλτιστη απορρόφηση φωτός, δεν μπορεί να διατηρήσει την συσσωρευση ελαστικής ενέργειας λόγω της κακής προσαρμογής του υποστρώματος του κρυστάλλου. Αυτό σημαίνει ότι η πλαστική χαλάρωση συμβαίνει αναπόφευκτα σε κάποιο σημείο της ετεροδομής. Δεν έχει σημασία πόσο χαμηλός είναι ο αριθμός των εκτεταμένων ελαττωμάτων, όπως οι διαταραχές, που μπορεί να φτάσουν την ενεργή περιοχή, αρνητικές επιπτώσεις τους στο "σκοτεινό" ρεύμα (αντίθετα από το φωτορεύμα) της κυψέλης είναι αναπόφευκτα σημαντικές. Επιπλέον, οι διαταραχές μπορούν να επιταχύνουν την υποβάθμιση της συσκευής και ως εκ τούτου να ελαττώσει τη διάρκεια ζωής της.</p> <p>Στο τυπικό σημείο λειτουργίας κάτω από ηλιακή συγκέντρωση (> 200X), τα SB-QWPV είναι "περιορισμένης ακτινοβολίας", δηλαδή κάθε ανασυνδυασμός χωρίς ακτινοβολία, με απουσία απωλειών, γίνεται αμελητέα. Αυτό το αποτέλεσμα, ονομάζεται "ανακύκλωση φωτονίου" που μπορεί να αξιοποιηθεί με το σχεδιασμό μιας κυψέλης κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ακτινοβολία που παράγεται από τον αναπόφευκτο ανασυνδυασμό φορέων, μερικώς ανακυκλώνεται και επιστρέφει πάλι στην ενεργό περιοχή της συσκευής, μειώνοντας έτσι το σκοτεινό ρεύμα (ενισχύοντας την τάσης ανοικτού κυκλώματος). Διπλές κυψέλες SBQWPV έχουν σχεδιαστεί για να επωφεληθούν πλήρως από το φαινόμενο "ανακύκλωσης φωτονίου" (με τη βοήθεια του φαινομένου σύζευξης ακτινοβολίας μεταξύ των υπο-κυψελών).</p>
Απουσία ελαττωμάτων κρυστάλλου	Βέλτιστη διαθέσιμη δομική σταθερότητα, βελτιωμένη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής.	
Ανακύκλωση φωτονίου	Υψηλότερη απόδοση μετατροπής από τις "ανταγωνιστικές" κυψέλες.	

5.3 Ηλιακές Κυψέλες Νανομετρικής Δομής

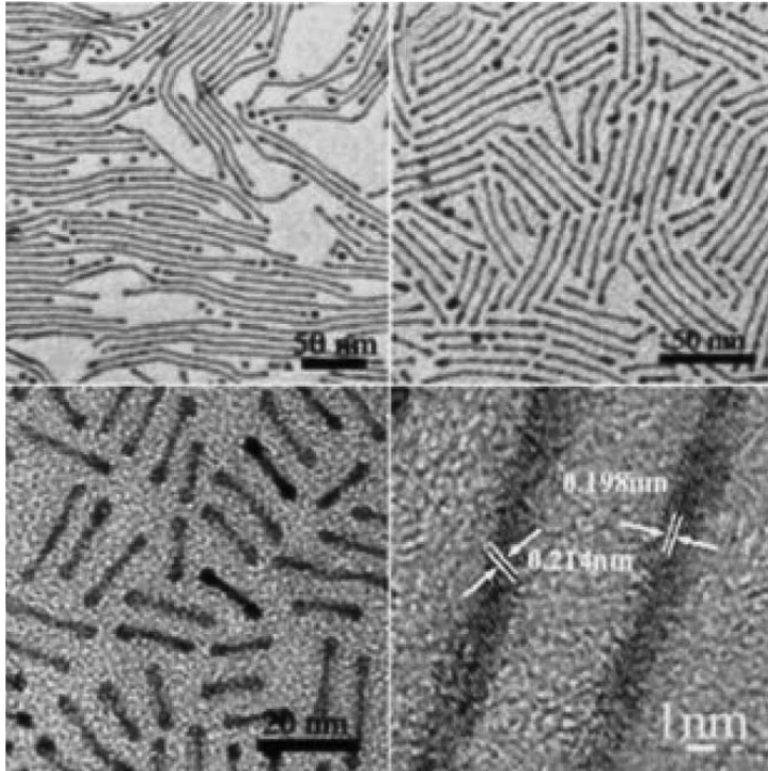
Η νανοτεχνολογία έχει ανοίξει νέες και πολλά υποσχόμενες δυνατότητες ώστε να μειωθεί το κόστος των Φ/Β κυψελών και μονάδων για μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενεργείας καθώς και για τη βελτίωση της απόδοσης μετατροπής. Για παράδειγμα, πιο πρόσφατα, μια ηλιακή κυψέλη 10cm x 10cm δημιουργήθηκε με χρήση της τεχνολογίας νανοδομής με αποδοτικότητα παρόμοια με εκείνη των συμβατικών κυψελών πυριτίου, αλλά με πολύ μικρότερο κόστος. Αυτό θα ενισχύσει τη χρησιμότητα της τεχνικής αυτής στην εμπορική παράγωγή ηλιακής ενεργείας.

Μεταλλικά καλώδια τα οποία είναι φτιαγμένα από πλατινένιες νανοράβδους (σχήμα 5.6), που συντίθενται σε διάλυμα μέσω μιας σχεδιάτυπης επιφανειοδραστικής επεξεργασίας ενός άλατος Pt (II), τοποθετούνται πάνω σε αγωγίμο γυαλί και μπορούν να αποτελέσουν τη βάση των ηλιακών κυψελών με απόδοση παρόμοια με εκείνη των συμβατικών κυψελών πυριτίου. Η τεχνική αυτή μειώνει την ποσότητα της πλατίνας που απαιτείται κατά 40% και βελτιώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με τις συνδεδεμένες συστοιχίες των πολύ μικρών κυψελών, στις οποίες το φως του ηλίου που χτυπά στο κενό μεταξύ των κυψελών δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Παρομοίως, η πρόσφατη ανακάλυψη μιας τέλει κρυσταλλικής δομής από InAs είναι μια από τις σημαντικές ανακαλύψεις που απαιτούνται για την ανάπτυξη, τρίτης γενιάς, ηλιακών μονάδων. Πράγματι, μια κυψέλη φτιαγμένη με αυτο το νέο υλικό θα είναι σε θέση να μετατρέψει έως και 30% της ηλιακής ενεργείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το να έχει δηλαδή μια τέλεια κρυσταλλική δομή, σημαίνει ότι απορροφά το προσπίπτον φως και επομένως μπορεί σύντομα να γίνει μια υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους ηλιακή κυψέλη. Το κόστος παραγωγής ηλιακών κυψελών μπορεί να μειωθεί επειδή απαιτείται χαμηλότερου κόστους ημιαγωγικό πυρίτιο κατά τη διαδικασία λόγω της χρήσης της νανοτεχνολογίας. Ταυτόχρονα, η ηλιακή κυψέλη θα αξιοποιήσει τη μειωμένη απώλεια ενεργείας λόγω της μικρότερης απόστασης, στην κυψέλη, μεταφοράς ενεργείας (μικρή απόσταση από το ζεύγος ηλεκτρονίου- οπής σε επαφή τύπου p-n).

Άλλα πιθανά πλεονεκτήματα του σχεδιασμού ηλιακών κυψελών της SunFlake περιλαμβάνουν:

- επαφές p-n σε τέλειους μονούς κρυστάλλους σε μη διχτυωτά αντιστοιχισμένα υποστρώματα
- χρησιμοποιούνται μόνο μικρές ποσότητες πολυδάπανου υλικού των Φ/Β στις νανοδομές, και καμία στο υπόστρωμα. Η SunFlake αναπτύσσει μια νέα γενιά ηλιακών κυψελών βασισμένη σε ένα νέο σχήμα ημιαγωγικών νανοδομών (**NanoFlakes**)



Σχήμα 5.6 Πλατινένιες νανοράβδοι παρόμοιες με εκείνες που κατασκευάζονται από σίδηρο-πλατίνα, επιτρέπει την παράγωγή των $(10 \times 10) \text{cm}^2$ ηλιακών κυψελών με 40% μείωση του ποσού της πλατίνας που απαιτείται. (Χορηγία εικόνας: Angewandte Chemie)

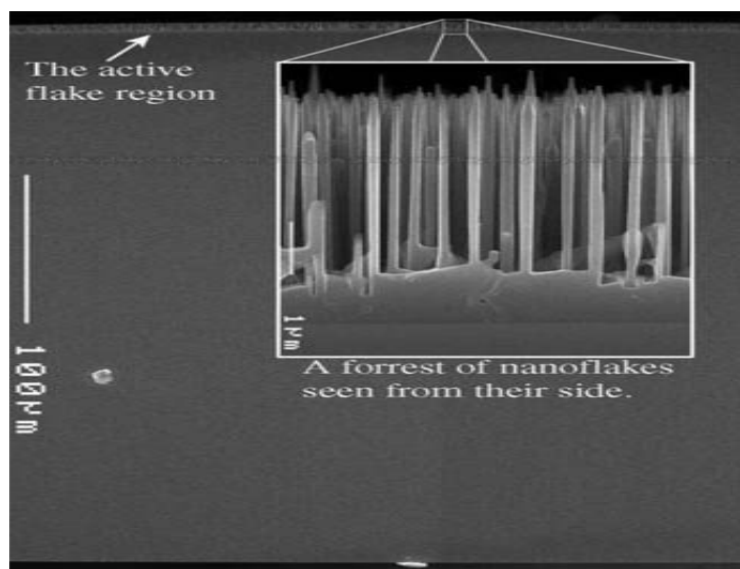
Μια περιορισμένη, μικρή εταιρεία, SunFlake, ιδρύθηκε με σκοπό να ξεκινήσει την παράγωγή των ηλιακών κυψελών με βάση τη νέα τεχνολογία.

Οι πατενταρισμένες νανοδομές, μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη για διχτυωτά αντιστοιχισμένα υποστρώματα καθώς και την ανάγκη ενός καθαρού βαθμιδωτού υποστρώματος. Οι μοναδικοί ρόλοι του υποστρώματος του φορέα είναι να καταστήσει δυνατή την ανάπτυξη νανοδομών και, όταν η ηλιακή κυψέλη είναι σε λειτουργία, να λειτουργεί ως μια επαφή με τις νανοδομές ηλιακής απορρόφησης.

Η επιφάνεια του υλικού αποτελείται από εξαιρετικά μικροσκοπικούς κρυστάλλους InAs που αναπτύσσονται από *επαξόνια ανάπτυξη μοριακής δέσμης (MBE)*³⁰ (Σχήμα 5.7), τα οποία παρέχουν μια τεράστια επιφάνεια στην οποία το φως του ηλίου μπορεί να δεσμευτεί. Με την αύξηση του χρόνου ανάπτυξης, η επαξόνια ανάπτυξη του ατμού-στερεού InAs, σε υψηλής ενέργειας επιφάνειες τις οποίες αναγκάζει να συνεχίσουν ανοδικά και προς τα έξω, αυξάνοντας έτσι το πλάτος της νανοπλάκας που τελικά φτάνει κατά μέσο όρο το πλάτος της βάσης της νανοπλάκας τα 350nm για 45min και 500nm σε 60lmin.

³⁰ Η επαξόνια ανάπτυξη μοριακής δέσμης είναι μία από τις πολλές μεθόδους εναπόθεσης μονών κρυστάλλων. Εφευρέθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '60 στο Bell Telephone Laboratories από τους J. R. Arthur και Alfred Y. Cho.

Υπό τις συνθήκες ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν, δημιουργήθηκαν επιφάνειες με απόληξη αρσενικού στις δυο πλευρές της κρυσταλλικής νανοράβδου οι οποίες είναι υψηλής ενέργειας επιφάνειες με σημαντικά υψηλό συντελεστή ενσωμάτωσης. Κατά συνέπεια, η ανάπτυξη InAs γίνεται πλέον σχεδόν μόνο σε αυτές τις υψηλής ενέργειας επιφάνειες προκαλώντας το δισδιάστατο σχήμα κρυστάλλων (Σχήμα 5.8). Μετά από 45-60 min, ανάλογα με τις συνθήκες ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν, οι νανοπλάκες έχουν τριγωνικό σχήμα με υψηλής ενέργειας επιφάνειες.



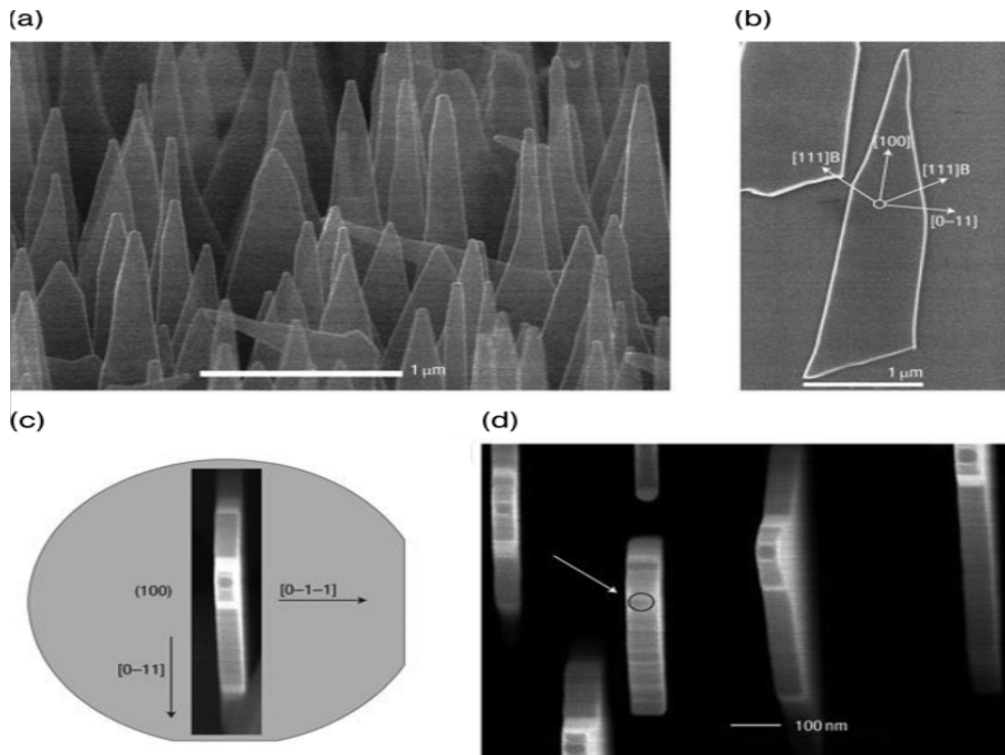
Σχήμα 5.7 Ένα δάσος από InAs «νανονιφάδων».

Χρησιμοποιώντας μια παρόμοια προσέγγιση, νανοσύρματα απορρόφησης φωτός από Φ/Β GaAs αναπτύχθηκαν πρόσφατα σε εύκαμπτο λεπτό πολυεστερικό φιλμ πυριτίου, άνθρακα (Σχήμα 5.9).

Τα νανοσύρματα αναπτύσσονται προς τα πάνω από το υπόστρωμα, δημιουργώντας μια επιφάνεια που είναι σε θέση να απορροφά περισσότερη ακτινοβολία από μια επίπεδη επιφάνεια. Είναι θεωρητικά εφικτό να επιτευχθεί απόδοση 40%, δεδομένης της ανώτερης ικανότητας αυτών των υλικών στην απορρόφηση ενέργειας του ηλιακού φωτός καθώς και της φύσης των δομών νανοσύρματος στην παγίδευση του.

Ο στόχος είναι να παράγει εύκαμπτες, οικονομικά προσιτές ηλιακές κυψέλες που αποτελούνται από νανοκαλώδια της ομάδας III-V, τα οποία μέσα σε πέντε χρόνια θα επιτύχουν απόδοση μετατροπής 20% και μακροπρόθεσμα 40%. Το κόστος μειώνεται με τα νανοσύρματα καθώς πολύ μικρότερες ποσότητες ενεργών υλικών χρησιμοποιούνται λόγω του εγγενώς ενισχυμένου τρόπου με τον οποίο η νανοδομή απορροφά το φως και αποσπά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του.

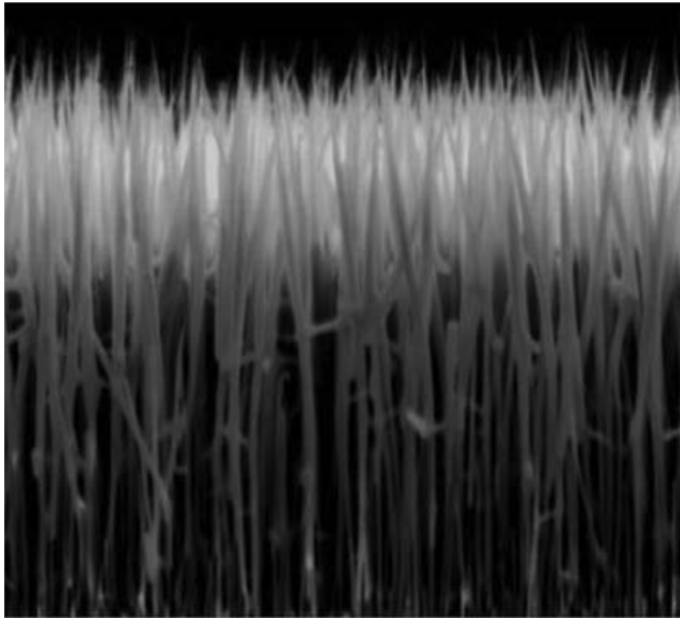
Σε συμβατικές ηλιακές κυψέλες οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πλάκες κρυσταλλικού υλικού, μεγαλύτερο πάχος σημαίνει και καλύτερη απορρόφηση του φωτός, αλλά επίσης σημαίνει ότι είναι πιο δύσκολο για τα ηλεκτρόνια να διαφύγουν.



Σχήμα 5.8 (a) Ένα «δάσος» από νανοπλάκες InAs αναπτύσσονται κάθετα απο την επιφάνεια ενός υποστρώματος GaAs. (b) Μια μονή πλάκα InAs μεταφέρθηκε σε μια επιφάνεια SiO₂ (c,d) Εικόνες SEM ακριβώς παραπάνω. Ο προσανατολισμός των νανοπλακών σε ένα υπόστρωμα φαίνεται στο (c) όπου απεικονίζεται η νανοπλάκα με πάχος 60nm. Το πάχος της πλάκας καθορίζεται από τη διάμετρο του καταλύτη Au σωματιδίου, όπως προκύπτει από τον κύκλο στο (d).

Αυτό το αναγκαστικό αντιστάθμισμα ξεπεράστηκε με τα νανოსύρματα. Κάθε νανόςυρμα είναι 10-100nm πλάτους και φτάνουν ως 5nm μήκος. Το μήκος τους μεγιστοποιεί την απορρόφηση, αλλά το πλάτος της νανοκλίμακα επιτρέπει μια πολύ πιο ελεύθερη κίνηση και συλλογή των ηλεκτρονίων. Η κατεύθυνση με την οποία το φως απορροφάται είναι ουσιαστικά κάθετη προς εκείνη στην οποία η ηλεκτρική ενέργεια συλλέγεται και έτσι το δίλημμα έχει ξεπεραστεί.

Μια παρόμοια προσέγγιση που κάνει χρήση των νανοσυρμάτων περιέχουν πολλαπλά στρώματα υλικών της ομάδας III-V όπως το αρσενικού γάλλιο, το Ινδία φωσφιδίου γαλλίου, το αλουμίνιο αρσενικούχο γάλλιο, και φωσφίδιο αρσενικούχο γαλλίου. Δημιουργεί διπλών ή πολλαπλών δομών ηλιακές κυψέλες που μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγαλύτερο εύρος του φωτεινού φάσματος σε σύγκριση με το πυρίτιο. Στις συμβατικές κρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες, τα υλικά της ομάδας III-V έχουν πολύ υψηλότερες αποδόσεις από ότι το πυρίτιο, αλλά λόγω του μεγάλου κόστους των υλικών έχει περιοριστεί η χρήση τους.



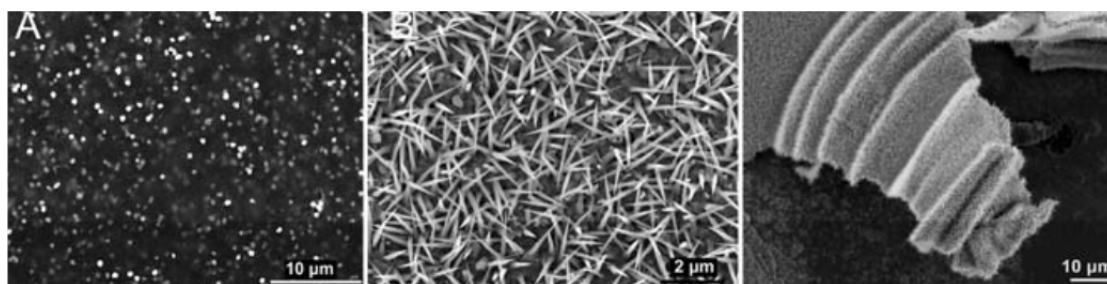
Σχήμα 5.9 Ένα «δάσος» από νανοσύρματα GaAs αναπτύσσεται σε ένα υπόστρωμα πυριτίου.

Εκτός από τη μείωση του κόστους με χρήση λιγότερου ενεργού υλικού, υπάρχει και μια μείωση στο κόστος του υποστρώματος πάνω στο οποίο αναπτύσσονται τα νανοσύρματα, με την χρήση πιο αφθόνου και σχετικά φθηνότερου πυριτίου, γυαλιού και πολυμερών φιλμ, ανοίγοντας έτσι το δρόμο για μια ανέξοδη R2R κατασκευή.

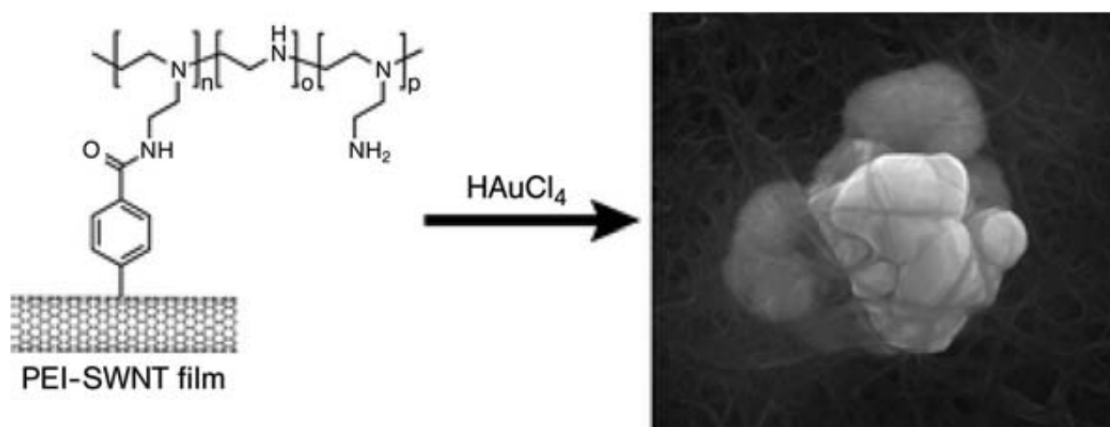
Μια άλλη ανεξάρτητη υπόσχεση που κατέχει η νανοδομή στην κατασκευή των εύκαμπτων «Φ/Β υφασμάτων», είναι μία «ψάθα», η οποία αποτελείται από πυκνές συστοιχίες νανοσυρμάτων GaAs οι οποίες προσφάτως αναπτύχτηκαν στην επιφάνεια ενός μονού τοιχώματος νανοσωλήνων άνθρακα (SWNT) σε ομοιοπολική λειτουργία με πολυαιθυλενεϊμίνη (PEI). Η διαδικασία απέδωσε τα πρώτα μακροσκοπικά δείγματα στα οποία τα νανოსωματίδια είναι ομοιόμορφα καταναμημένα σε υψηλή πυκνότητα σε όλο το υπόστρωμα των νανοσωλήνων. Αυτό επιτεύχθηκε διοχετεύοντας ένα υδατικό διάλυμα PEI-SWNTs μέσα από μια πολυανθρακική μεμβράνη με διάμετρο πόρου 0,2mm. Οι προκύπτουσες PEI-SWNT «ψάθες» παρουσιάζουν άριστες μηχανικές ιδιότητες, καθώς είναι ιδιαίτερα εύκαμπτες και μπορούν να κάμπτονται και να διπλώνουν χωρίς ρωγμές. Επιπλέον, τα καθορισμένα νανοςωματίδια Au μπορούν να εισαχθέν σε αυτό το φιλμ μέσω μείωσης των διαλυμάτων HAuCl_4 , πράγμα που οδηγεί σε ελεγχόμενη κατανομή του μεγέθους και της πυκνότητας των νανοςωματιδίων Au στους νανοσωλήνες των «ψαθών»

Τα προκύπτοντα υλικά είναι λεπτά, εύκαμπτα, ηλεκτρικά αγωγίμα και διαφανή ηλεκτρόδια που είναι ανώτερα από τα συμβατικά διαφανή αγωγίμα οξειδία (Σχήμα 5.10) και δίνουν μεγάλη υπόσχεση ως φωτοδραστικά υλικά για τις μελλοντικές εύκαμπτες ηλιακές κυψέλες.

Η απλή μέθοδος παραγωγής των Λ/Φ νανοσωλήνων άνθρακα που περιέχουν νανοσωματίδια Au, χρησιμοποιεί SWNT που αποκτά λειτουργικότητα μαζί με εξαιρετικά διακλαδισμένης PEI ($M_n = 10 \text{ kDa}$) της οποίας η υψηλή διαλυτότητα στο νερό (180 mgL^{-1}), επιτρέπει το σχηματισμό ομοιογενών Λ/Φ με διήθηση εν κενώ. Τα φιλμ στη συνέχεια αποκτούν λειτουργικότητα με συστάδα νανοσωματιδίων Au με επί τόπου αναγωγή του HAuCl_4 κάτω από ήπιες συνθήκες και χωρίς επιπλέον αναγωγικά μέσα (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.10 (A) Εικόνες SEM από νανοσωματίδια Au ενσωματωμένα μέσα σε φιλμ PEI-SWNT, (B) νανوسύρματα GaAs που αναπτύσσονται από το φιλμ νανოსωλήνων, (C) σκισμένο τμήμα παρόμοιου φιλμ που περιέχει νανوسύρματα, φανερώνει την ευκαμψία του φιλμ.

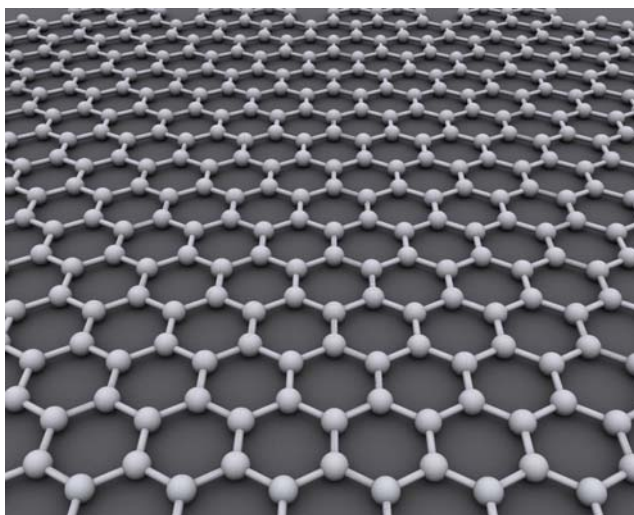


Σχήμα 5.11 Η νανοχημική αυτή διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό σωματιδίων – «σπόρων» για ενισχυμένη «ανάπτυξη» των νανοςωλήνων στην επιφάνεια ενός αγωγίμου, ιδιαίτερα εύκαμπτου υποστρώματος.

5.4 Ηλιακές Κυψέλες από Γραφένιο (Graphene)

Το γραφένιο (Σχήμα 5.12) - ανακαλύφθηκε μόλις το 2004 - ένα επίπεδο, μονατομικό χοντρό φύλλο άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιείται ως υπέρλεπτο διαφανές αγωγίμο φιλμ για ηλεκτρόδια παραθύρου στον τομέα των ηλιακών κυψελών. Τέτοια αγωγή, διαφανή, και υπέρλεπτα φιλμ γραφενίου λαμβάνονται από οξειδίο αποφλοιωμένου γραφίτη, που ακολουθείται από θερμική αναγωγή, έχει πάχος περίπου 10nm και έχει υψηλή αγωγιμότητα, συγκρίσιμη με εκείνη του

πολυκρυσταλλικού γραφίτη, και ποσοστό διαφάνειας άνω του 70% για πάχη 1000-3000 nm. Τα φίλμ γραφενίου μπορούν επίσης να παρασκευαστούν, μέσω σταδιακά αυξανόμενης διαδικασίας “*bottom-up*”³¹ εξαιρετικά μεγάλων PAH³², μόρια νανογραφενίου, που ακολουθείται από θερμική σύντηξη. Για να καταδειχθεί ότι τα διαφανή φίλμ γραφενίου είναι δυνητικά ηλεκτρόδια παραθύρου για τα οπτικο-ηλεκτρονικά, μια στερεά ηλιακή κυψέλη «ευαισθητοποιημένη» με χρωστική ουσία που χρησιμοποιεί φίλμ γραφενίου ως άνοδο και χρυσό ως κάθοδο έχει κατασκευαστεί (Σχήμα 5.13).



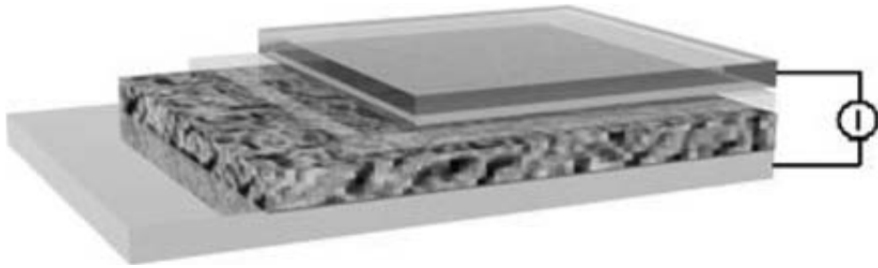
Σχήμα 5.12 Το γραφένιο είναι ένα κυψελωτό κρυσταλλικό πλέγμα κατασκευασμένο από αλλοτροπικό άνθρακα.

Η αποδοτικότητα αυτών των μη βελτιστοποιημένων DSC είναι χαμηλότερη από τις παραδοσιακές ηλιακές κυψέλες με επίστρωση διοξειδίου του τιτανίου, αλλά υπάρχει μεγάλο περιθώριο για βελτίωση της απόδοσης της συσκευής, για παράδειγμα, την περαιτέρω αύξηση της αγωγιμότητας του φίλμ γραφενίου μέσω της χρήσης μεγάλων φύλλων γραφενίου.

Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, οι εξαιρετικές ιδιότητες του παραγόμενου καταυτόν τον τρόπο φίλμ γραφενίου που περιλαμβάνει υψηλή αγωγιμότητα, καλή διαφάνεια τόσο στο ορατό φως όσο και σε περιοχές κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία, την εξαιρετικά ομαλή επιφάνεια με ρυθμιζόμενη διαβρεξιμότητα, και υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα, καθιστούν τα ηλεκτρόδια γραφενίου κατάλληλα ως μία πολύ εφαρμόσιμη εναλλακτική επιλογή για το μέλλον των ηλιακών κυψελών. Επιπλέον, η απλή επεξεργασία επιτρέπει την ανέξοδη και μεγάλης κλίμακας βιομηχανική παραγωγή, ένας άλλος λόγος γιατί η έννοια της χρήσης

³¹ Η διαδικασία σύνθεσης του υλικού από ατομικά ή μοριακά είδη μέσω χημικών αντιδράσεων, επιτρέποντας στα πρόδρομα σωματίδια να μεγαλώσουν σε μέγεθος, ονομάζεται "bottom-up".

³² Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες



Σχήμα 5.13 Απεικόνιση των ηλιακών κυψελών με ηλεκτρόδια γραφενίου. Είναι ορατή η ηλιακή κυψέλη «ευαισθητοποιημένη» με χρωστική ουσία της ηλιακής κυψέλης με χρήση φιλμ γραφενίου ως ηλεκτρόδιο, τα τέσσερα στρώματα από κάτω προς τα πάνω είναι χρυσό, «βαφο-ευαισθητοποιημένη» ετεροδομή, συμπαγές διοξειδίο του τιτανίου, και φιλμ γραφενίου. (Χορηγία εικόνας: Ινστιτούτο Max Planck για έρευνα πολυμερών υλικών).

ηλεκτροδίων γραφενίου αναδύεται ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για το μέλλον οπτικο-ηλεκτρονικών συσκευών.

Με την ίδια λογική, τα ανεξάρτητα στρώματα γραφενίου που χρησιμοποιούν, την προσφάτως ανεπτυγμένη, μηχανική προσέγγιση του ενεργειακού κενού, είναι πολύ πιθανό να ανοίξει το δρόμο για μια νέα γενιά Φ/Β με κυψέλες άνθρακα. Πράγματι, ένα σημαντικό ενεργειακό κενό της τάξης των 0,26 eV έχει πρόσφατα εισαχθεί στην δομή ηλεκτρονικής ζώνης. Αυτός ο αλλοτροπικός άνθρακας, κατασκευάστηκε για πρώτη φορά το 2004 από την απλή επιταξιακή³³ ανάπτυξη³⁴ γραφενίου των δισδιάστατων κρυστάλλων του σε ένα υπόστρωμα καρβιδίου του πυριτίου.

Το γραφένιο είναι ένα πυκνό ενιαίο στρώμα από άτομα άνθρακα, τοποθετημένα σε ένα εξαγωνικό μοτίβο σαν κηρήθρα, που σχηματίζει ένα δισδιάστατο φύλλο. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν βαλλιστικά μέσα από το γραφένιο, ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου, το οποίο σημαίνει ότι μπορούν να «πετάξουν» μέσα από το φύλλο όπως τα φωτόνια μέσα στο κενό, χωρίς να υποβάλλονται σε καμία σύγκρουση με άτομα που παράγουν θερμότητα και περιορίζουν την ταχύτητα και το μέγεθος των συσκευών πυριτίου.

Το κενό των 0,26eV δημιουργείται όταν η συμμετρία πλέγματος του γραφενίου σπάει (υποδεικνύεται από εναλλασσόμενα κόκκινα και μπλε άτομα άνθρακα, στο σχήμα 6.14 a και b) ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του γραφενίου και του υποστρώματος. Η διάσπαση της συμμετρίας χωρίζει τις ζώνες των

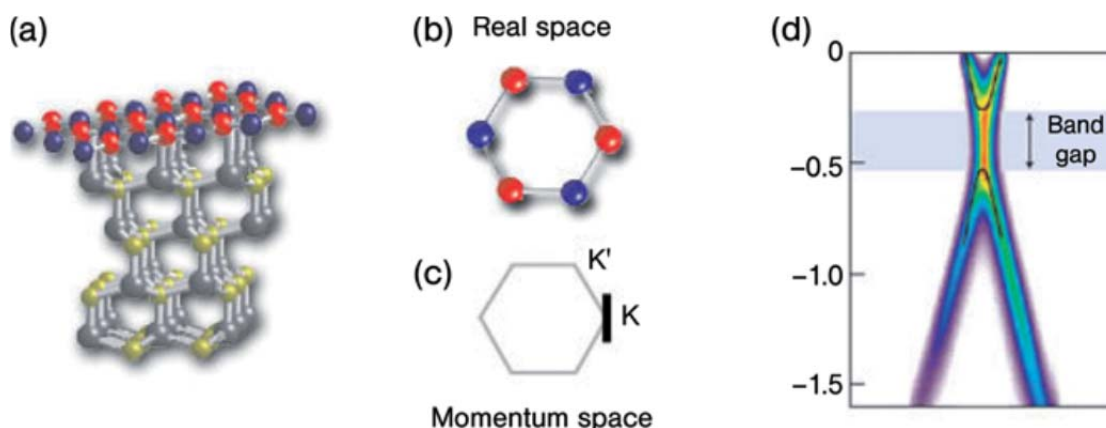
³³ "Μεγαλώνοντας" ένα στρώμα κρυστάλλου ενός ορυκτού στη βάση κρυστάλλου ενός άλλου ορυκτού κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο κρυσταλλικός προσανατολισμός να είναι ίδιος με εκείνον του υποστρώματος.

³⁴ Η παραγωγή (ημιαγωγών) κρυστάλλων από την αργή κρυσταλοποίηση από την κατάσταση τήξης.

υποπλεγμάτων σε K και K' στον χώρο ορμής³⁵ (**momentum-space**) (Σχήμα 6.14c) και δημιουργεί ένα ενεργειακό κενό μεταξύ του σθένους του γραφενίου και της ζώνης αγωγιμότητας.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του γραφενίου και του υποστρώματος πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή ώστε να δημιουργεί ένα ενεργειακό κενό, αλλά όχι τόσο ισχυρή ώστε να χάσει τις σημαντικές ιδιότητές του το γραφένιο. Επιλέγοντας το σωστό υπόστρωμα, ως εκ τούτου, η επίδραση αυτή ανοίγει το δρόμο για τον σχεδιασμό του ενεργειακού κενού του γραφενίου, καθώς διαφορετικά υποστρώματα έχουν διαφορετικές δυνατότητες, και η δύναμη της αλληλεπίδρασης μεταξύ του γραφενίου και του υποστρώματος οδηγεί σε διαφορετικά μεγέθη ενεργειακών κενών.

Οι κυψέλες γραφενίου θα μπορούσαν να εξαλείψουν το πρόβλημα της έλλειψης ινδίου που μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών λεπτού φιλμ. Το ινδίο είναι ακριβό και σπάνιο, και η ζήτηση αυξάνεται. Από τα χαμηλά επίπεδα των \$60/kg το 2002, οι τιμές του ινδίου αυξήθηκαν σε πάνω από \$1000/kg κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2007. Πρόσφατα, οι τιμές έχουν μειωθεί σε \$400-\$500/kg. Ωστόσο, το κόστος του ινδίου μπορεί σύντομα να είναι άνευ αντικειμένου, διότι οι γεωλόγοι αναφέρουν ότι τα αποθέματα αυτού του στοιχείου θα μπορούσαν να εξαντληθούν μέσα σε λίγα μόλις χρόνια.



Σχήμα 5.14 υπόστρωμα SiC (α) σπάει τη συμμετρία και διαχωρίζει τις ζώνες του υποπλέγματος σε K και K' στον χώρο ορμής (γ) και δημιουργεί ένα ενεργειακό χάσμα μεταξύ του σθένους του γραφενίου και της ζώνης αγωγιμότητας, όπως φαίνεται στο χάρτη έντασης ARPES (δ), που αναπαριστά τη μαύρη γραμμή (γ). Το ενεργειακό κενό αυξάνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του γραφενίου σε φωτοβολταϊκά. (Χορηγία εικόνας: Πανεπιστήμιο Berkeley).

³⁵ Ο χώρος ορμής ή k -χώρος που συνδέεται με ένα σωματίδιο, είναι ένας διανυσματικός χώρος στον οποίο κάθε σημείο $\{k_x, k_y, k_z\}$ αντιστοιχεί σε μια πιθανή τιμή του διανύσματος της ορμής.

5.5 Ανορθωτικές Νανοκεραίες

Οι τρέχουσες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών βασίζονται στην κβαντική φύση του φωτός και των ημιαγωγών που θεμελιωδώς περιορίζονται από τα ενεργειακά κενά. Μια επαναστατική νέα προσέγγιση που προτείνει ο *Robert L. Bailey*³⁶ το 1972, που περιστρέφεται γύρω από την κυματική φύση του φωτός.

Η ιδέα ήταν ότι οι ευρυζωνικές ανορθωτικές κεραίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική DC. Αυτές οι νανοκεραίες (**Rectifying Nano-Antenna / RNA**) δεν θα είχαν τον θεμελιώδη περιορισμό των ενεργειακών κενών των ημιαγωγών που περιορίζουν την απόδοση μετατροπής τους. Οι RNA για την μετατροπή ηλιακής ενέργειας θα έχουν διαστάσεις της τάξης του μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, που κυμαίνεται στην περιοχή των υπομικρόμετρων. Οι προκλήσεις στην πραγματικότητα για την επίτευξη των στόχων είναι πολλές.

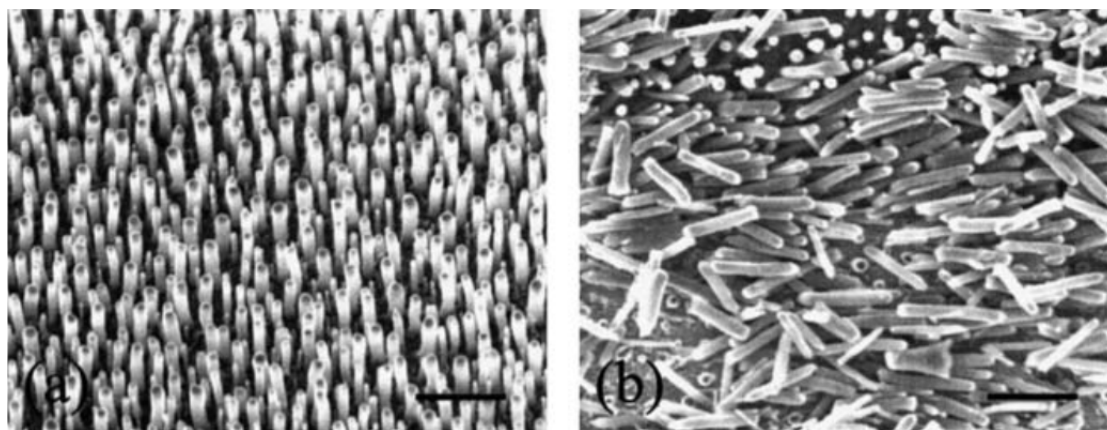
Η έννοια της κεραίας βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Με άλλα λόγια, τα κύματα είναι ταλαντευόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά κύματα που μεταδίδονται από τον ήλιο στη γη. Τα εισερχόμενα κύματα φωτός ταλαντώνουν τα ηλεκτρόνια σε μια κεραία συντονισμένη με το μήκος κύματος του φωτός - εξ ου και οι συσκευές πρέπει να είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων νανομέτρων. Η ευρυζωνική ασύμφωνη φύση του ηλιακού φάσματος απαιτεί επίσης ένα ευρύ φάσμα μεγεθών κεραίας για να ταιριάζει με όλα τα μήκη κύματος και να καλύπτει την ανάγκη να οργανώσει τις δύο κατευθύνσεις της πόλωσης.

Νέες, υψηλής απόδοσης, ηλιακές κυψέλες χρησιμοποιούν συστοιχίες ευθυγραμμισμένων πολυστρωματικών νανοσωλήνων άνθρακα (**MWCNT**), που «καλλιεργούνται» σε μεταλλικό υπόστρωμα (Σχήμα 5.15) χρησιμοποιώντας μία διαδικασία χημικής εναπόθεσης ενισχυμένου πλάσματος ατμών (**PECVD-EBPVD**³⁷), σαν οπτικές RNA, λαμβάνοντας και εκπέμποντας φως στην υπεριώδη, ορατή και υπέρυθη συχνότητα. Επιπλέον, η κυψέλη περιλαμβάνει έναν ημιαγωγό, που ενεργεί ως ανορθωτής, έχοντας στο ένα άκρο συνδεδεμένη την οπτική κεραία και στο άλλο άκρο συνδέεται με ένα υπόστρωμα. Ένα μεταλλικό στρώμα περιβάλλει τον ανορθωτή, μέσα στο οποίο η οπτική κεραία δέχεται την ενέργεια και την μετατρέπει από AC σε DC κατά μέσω του ανορθωτή.

³⁶ Robert L. Bailey ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την ιδέα της νανοανορθωτικής κεραίας το 1972

³⁷ Εναπόθεση ατμού με δέσμη ηλεκτρονίων EBPVD είναι μια μορφή φυσικής εναπόθεσης ατμών κατά την οποία ο στόχος-άνοδος βομβαρδίζεται με μια δέσμη ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από φορτισμένο, πυρακτωμένο βολφράμιο κάτω από υψηλό κενό. Η δέσμη ηλεκτρονίων προκαλεί άτομα από τον "στόχο" να περάσουν σε αέρια φάση. Τα άτομα αυτά έπειτα καθιζάνουν και περνάνε σε στερεά μορφή, επιστρώνοντας τα πάντα στο θάλαμο κενού (σε ακτίνα οπτικής επαφής) με ένα λεπτό στρώμα του υλικού της ανόδου.

Η διαδικασία κατασκευής “bottom-up” εκμεταλλεύεται τη σύνθεση νανοϋλικών, και πραγματοποιείται από μια κλιμακούμενη τεχνική στρώμα-στρώμα συμβατή με μεγάλης κλίμακας βιομηχανική παραγωγή. Μια τυπική συσκευή μετατροπής της ενέργειας, με χρήση της διαδικασίας “bottom-up”, φαίνεται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.15 Ευθυγραμμισμένες (α) και «ανακατεμένες» (β) συστοιχίες MWCNTs. Κάθε νανοσωλήνας είναι μια μεταλλική ράβδος διαμέτρου περίπου 50nm και μήκους περίπου 200 - 1000 nm. Ως εκ τούτου, μπορεί κανείς να δει την αλληλεπίδραση αυτών των συστοιχιών με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως αυτή μιας συστοιχίας δίπολων κεραίων.

Ένα ημιαγωγικό λεπτό φιλμ 710 (όπως το p^+ -Si) εναποτίθεται σε ένα αγωγικό υπόστρωμα 705 (όπως το Al), όπου στη συνέχεια πραγματοποιούνται κάποιες πρότυπες διαδικασίες για να σχηματίσουν μια ωμική επαφή. Ένα καταλυτικό υλικό 715, όπως το Ni, εναποτίθεται πάνω στο ημιαγωγικό φιλμ 710 χρησιμοποιώντας την διαδικασία καθοδικού διασκορπισμού *μαγνήτρου*³⁸.

Αναπτύχθηκαν νέες στρατηγικές νανοχημείας, για τη χημική σύνθεση των νανοσωλήνων, στις αρχές της δεκαετίας του 2000, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή των ηλιακών RNAs. Πράγματι, έχει επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος και η διάμετρος των νανοσωλήνων άνθρακα (CNT), με ακριβή έλεγχο των χημικών παραμέτρων της ανάπτυξης. Το πάχος εναπόθεσης του καταλυτικού υλικού 715 έχει άμεση επίπτωση στη μέση διάμετρος των ευθυγραμμισμένων CNTs.

Καθαρές, ευθυγραμμισμένες συστοιχίες CNT 715 με σωματίδια Ni στην κορυφή μπορούν στη συνέχεια να αναπτυχθούν με μια DC ηλεκτρική *εκκένωση αίγλης*³⁹, που ουσιαστικά δημιουργεί ένα *πλάσμα*⁴⁰, σε περιβάλλον αποτελούμενο από

³⁸ Μάγνητρο ονομάζουμε τη συσκευή «διασταυρούμενων πεδίων», στη βιομηχανία, επειδή και το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο «εμπλέκονται» στην λειτουργία του, όπου παράγονται σε κάθετες κατευθύνσεις, έτσι ώστε να διασταυρώνονται.

³⁹ Μια ηλεκτρική εκκένωση αίγλης είναι ένα πλάσμα που σχηματίζεται από το πέρασμα ρεύματος τάσης από 100V μέχρι και αρκετά kV μέσω ενός αερίου. Χρησιμοποιείται στη φυσική πλάσματος και την αναλυτική χημεία.

NH₃ και C₂H₂, όπως φαίνεται στο βήμα 740. Ένα χρόνος «καλλιέργειας» της τάξης των 1-2 λεπτών, αποδίδει CNTs έως 1000 nm. Η μορφολογία των CNTs συμπεριλαμβανομένου του μήκους, της διαμέτρου, της ευθύτητας και ούτω καθεξής, μπορεί να είναι εξαιρετικά ρυθμισμένη με τις άλλες παραμέτρους της ανάπτυξης, όπως η ένταση του πλάσματος και ο χρόνος χάραξης με πλάσμα⁴¹, τη θερμοκρασία και το συνολικό χρόνο «καλλιέργειας». Ένα χρόνος ανάπτυξης της τάξης των 1-2 λεπτών αποδίδει CNTs έως 1000 nm. Η μορφολογία των CNTs που περιλαμβάνει το μήκος, την διάμετρο, την ευθύτητα και ούτω καθεξής, μπορεί να ρυθμιστεί εξαιρετικά από τις άλλες παραμέτρους της ανάπτυξης, όπως η ένταση του πλάσματος και ο χρόνος χάραξης με πλάσμα, η θερμοκρασία και ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης.

Σε αυτήν τη διάρθρωση, στο κάτω μέρος της κάθε CNT, δημιουργείται μία δομή σήραγγας, από έναν ημιαγωγό CNT (Sc) σε νανοκλίμακα, η οποία ανορθώνει το AC ρεύμα, που δημιουργήθηκε από την διέγερση μέσα σε κάθε κεραία, σε ένα συνεχές ρεύμα σε οπτικές συχνότητες⁴². Τα χαρακτηριστικά της δομής σήραγγας CNT-Sc μοιάζουν με μία συμβατική δομή σήραγγας μετάλλου-ημιαγωγού, λόγω της εγγενούς μεταλλικής ιδιότητας των MWCNTs. Οι CNTs θα πρέπει να έχουν μέση διάμετρο μικρότερη των 70 νανομέτρων για να έχουμε ένα σημαντικό κβαντομηχανικό φαινόμενο σήραγγας που θα κυριαρχήσει της θερμιονικής εκπομπής⁴³.

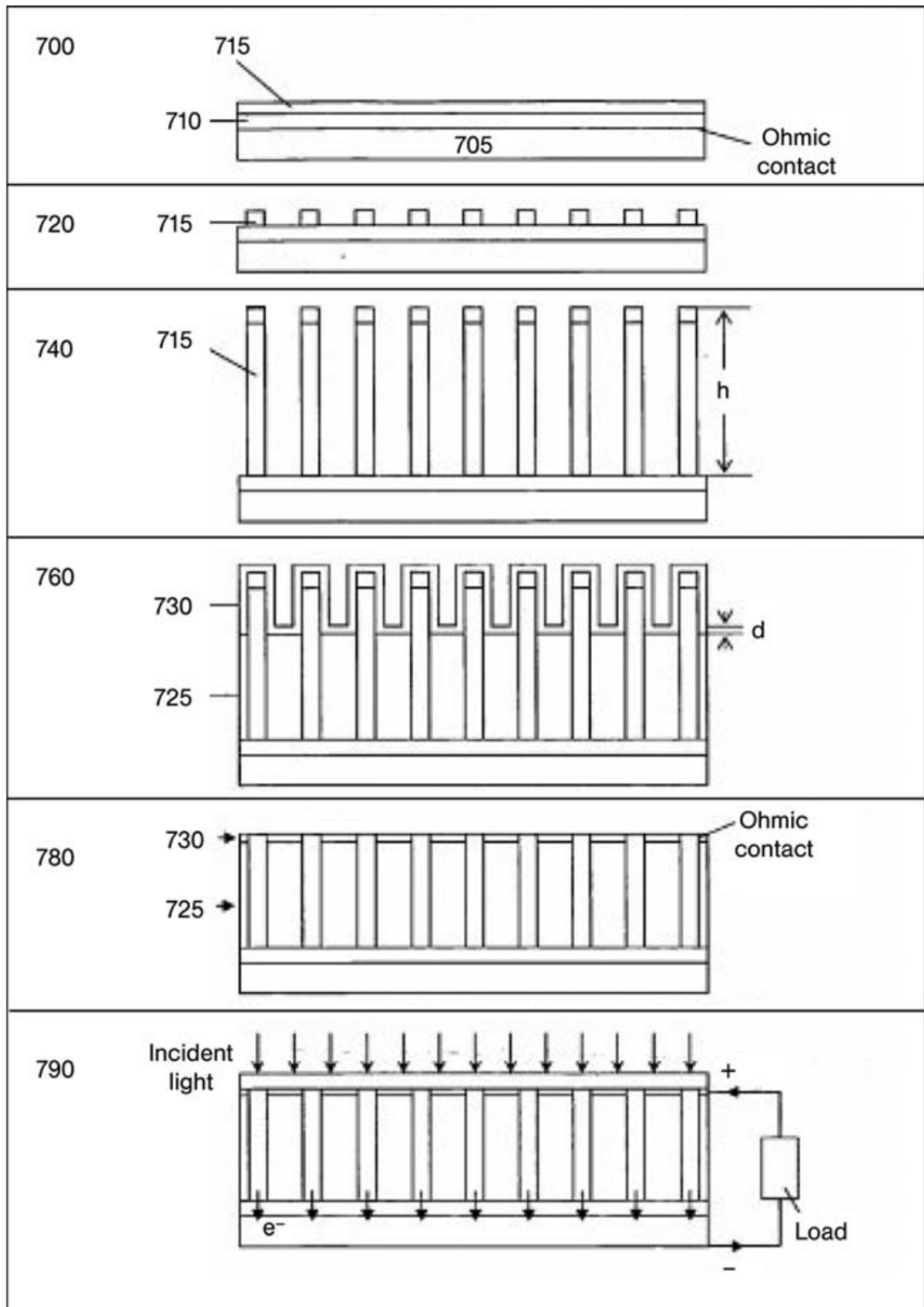
Ένα εξαιρετικά διαφανές στρώμα αδρανοποίησης 725 (ένα ελαστομερές σιλικόνης, για παράδειγμα), στη συνέχεια επικαλύπτεται με περιστροφική κίνηση ανάμεσα στα CNTs, όπως φαίνεται στο βήμα 760, μέχρι το ύψος h του $\lambda/4n-d$ ή $\lambda/2n-d$ (50nm- 500nm για ορατή και εγγύς στην υπέρυθη ακτινοβολία), όπου λ είναι το μήκος κύματος του φωτός που προσπίπτει στο κενό, n ο δείκτης διάθλασης του υλικού αδρανοποίησης 725 και d το πάχος. Η περιστροφική επικάλυψη μπορεί να

⁴⁰ Στη φυσική και τη χημεία, το πλάσμα είναι μια κατάσταση της ύλης παρόμοια με αέριο στην οποία ένα ορισμένο μέρος των σωματιδίων είναι ιονισμένο.

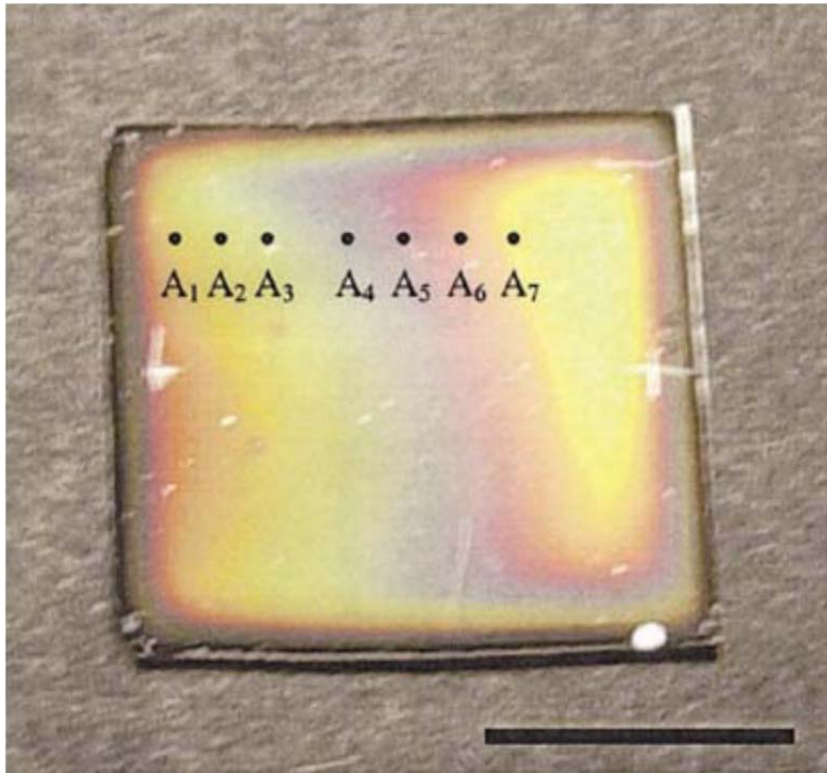
⁴¹ Χάραξη με πλάσμα είναι μια μορφή επεξεργασίας πλάσματος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Πρόκειται για μία υψηλής ταχύτητας ροή της εκκένωσης αίγλης (πλάσμα) από ένα κατάλληλο μείγμα αερίων που "χτυπήθηκαν" (σε παλμούς) σε ένα δείγμα.

⁴² Οπτική συχνότητα ονομάζουμε εκείνη την συχνότητα που είναι συγκρίσιμη με εκείνη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην οπτική περιοχή πάνω από 3×10^{11} Hz.

⁴³ Θερμιονική εκπομπή είναι η θερμότητα που προκαλείται από τη ροή των φορέων φορτίου από μια επιφάνεια ή ένα φράγμα δυναμικού. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμική ενέργεια που δόθηκε στον φορέα υπερβαίνει το δυναμικό δεσμού. Οι φορείς φορτίων μπορεί να είναι ηλεκτρόνια ή ιόντα.



Σχήμα 5.16 Μια τυπική συσκευή μετατροπής ενέργειας, που βασίζεται σε νανο-κεραίες, χρησιμοποιώντας την διαδικασία “bottom-up”.



Σχήμα 5.17 Επίδραση μήκους κεραίας. *Παρεμβολή χρωμάτων*⁴⁴ από την συστοιχία MWCNTs. A1-A7 είναι οι επιλεγμένες θέσεις, όπου πραγματοποιήθηκαν οπτικές μετρήσεις και μετρήσεις μήκους. Κλίμακα μαύρης γραμμής, 1 cm. Η εφεύρεση αυτή της νανοτεχνολογίας επιλύει το μεγαλύτερο πρόβλημα όσον αφορά την επίτευξη της κεραίας μετατροπής ηλιακής ενέργειας (ASEC), δηλαδή την ικανότητα να ανορθώνει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο φάσμα των υψηλών συχνοτήτων της ορατής και IR ακτινοβολίας. Αν και οι υπέρυθρες ακτίνες δημιουργούν εναλλασσόμενο ρεύμα στην νανο-κεραία, η συχνότητα ταλάντωσης του ρεύματος είναι δέκα χιλιάδες δισεκατομμύρια φορές το δευτερόλεπτο (10^{13} Hz), πάρα πολύ μεγάλη συχνότητα για τις ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες λειτουργούν σε ρεύματα που ταλαντώνονται μόνο 60 φορές το δευτερόλεπτο (60 Hz).

γίνει με τη μεταβολή του ιξώδους του διαλύματος του πολυμερούς και του ρυθμού περιστροφής. Μετά το ψήσιμο (συνήθως σε <200 °C), ένα λεπτό φιλμ (πάχους $d \ll \lambda/4n$ ή $\lambda/2n$) από διαφανές αγώγιμο υλικό 730 (όπως το ITO ή το ZnO) έχει εναποτεθεί πάνω στο στρώμα αδρανοποίησης 725 και το εκτεθειμένο μέρος των CNTs 715 με εξάτμιση δέσμης ηλεκτρονίων ή με καθοδικό διασκορπισμό, όπως φαίνεται στο βήμα 760.

Οι CNTs «μεγαλώνουν» αρκετά σε μήκος ($> \lambda/4n$ ή $\lambda/2n$, αντίστοιχα), έτσι ώστε, με το προσεκτικό γυάλισμα της επιφάνειας σε αυτό το στάδιο, οι προεξέχοντες πόλοι CNT θα διαλυθούν και θα απομακρυνθούν μαζί με τις αγώγιμα υλικά που επικαλύπτουν τους πόλους, εκθέτοντας την εγκάρσια τομή του CNT, όπως φαίνεται

⁴⁴ Παρεμβολή χρωμάτων, είναι τα χρώματα που σχηματίζονται από την παρεμβολή μιας ακτίνας φωτός που περνά μέσα από ένα λεπτό τμήμα ενός ορυκτού. Το φαινόμενο αυτό είναι μια παρενέργεια του φωτός που επιβραδύνεται καθώς περνά μέσα από διαφορετικές ουσίες.

στο βήμα 780. Οι εγκάρσιες τομές τείνουν να κλείνουν αυτόματα ή μερικώς με την κατάρρευση των τοιχωμάτων CNT κοντά στο ανοικτό άκρο.

Οι επιστρώσεις του CNT, από διάφανο αγωγίμο υλικό, είναι ωμικές. Ένα πρόσθετο λεπτό στρώμα από το ίδιο υλικό αδρανοποίησης 725 μπορεί να είναι και πάλι περιστροφικά επικαλυμμένο στην κορυφή για την παροχή ενός ενιαίου διηλεκτρικού μέσου που να περιβάλλει τις κεραίες CNT και να τις προστατεύει από εξωτερική επίθεση. Επιτυγχάνεται έτσι μια διάταξη όπου όλοι οι CNT των RNA ως μεμονωμένες πηγές ρεύματος συνδέονται παράλληλα και τα ανορθωμένα DC ρεύματα προστίθενται και δίνουν ένα πολύ μεγαλύτερο μέγεθος, συνοδευόμενο από, σημαντικά μειωμένη συνολική εσωτερική αντίσταση των RNAs 715.

Τα δύο αγωγή στρώματα μπορούν να συνδεθούν παράλληλα με ένα εξωτερικό φορτίο όπως ηλεκτρόδια DC, όπως φαίνεται στο βήμα 790. Η, τόσο καθιερωμένη, συσκευή μετατροπής ενέργειας μονού μήκους κύματος, όταν το προσπίπτον φως είναι πολωμένο προς την κατεύθυνση ευθυγράμμισης της CNT, θα μετατρέψει την ενέργεια φωτονίου σε ηλεκτρική ενέργεια DC με απόδοση περίπου άνω του 90%.

Το άλλο βασικό χαρακτηριστικό μιας κεραίας είναι η συμπεριφορά αντίδρασης συντονισμού της σε συνάρτηση με το μήκος κύματος ακτινοβολίας. Αυτό προκύπτει από την προϋπόθεση ότι οι ταλαντώσεις του επαγόμενου ρεύματος που πρέπει να ταιριάζουν με το μήκος της κεραίας. Μια γενική εξίσωση που περιγράφει τα μέγιστα της σκέδασης⁴⁵ από μια συστοιχία δίπολων κεραίων (με εξαφάνιση του ρεύματος από κάθε μέλος) είναι:

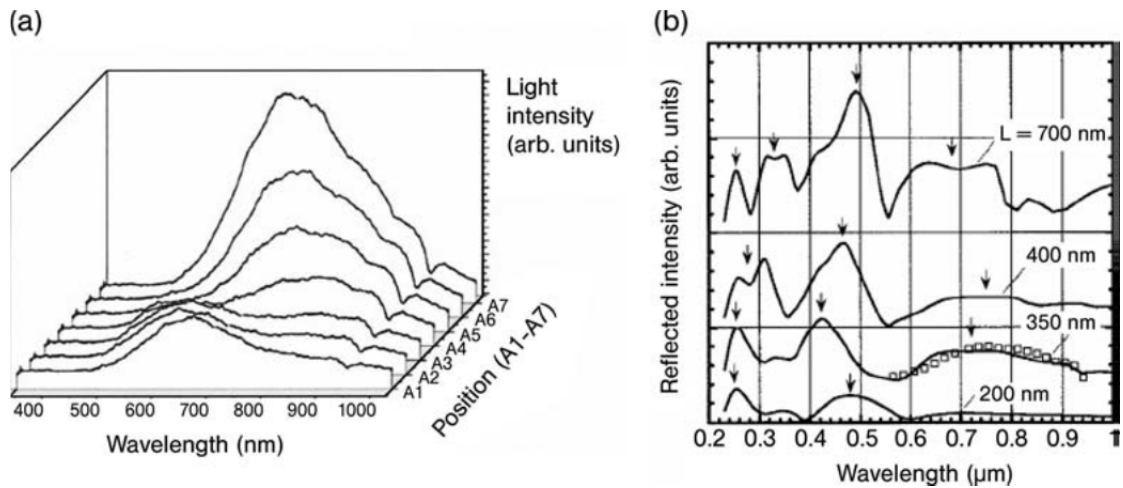
$$L = m \cdot (\lambda/2) \cdot f(\theta, n) \quad (5.1)$$

Όπου L το μήκος της κεραίας, m είναι ο λόγος της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην κεραία σε σχέση με αυτή στο κενό, $f(\theta, n) = 1$ για ένα μονό, απλό δίπολο, και $f(\theta, n) = (n^2 - \sin^2\theta)^{-1/2}$ εντός των ορίων της πολύ πυκνής συστοιχίας (όριο λεπτού φιλμ), όπου ο μέσος όρος απόστασης των κεραίων είναι $D < \lambda$, $f(\theta, n)$ είναι ίσο με περίπου 1, και εξαρτάται ασθενώς μόνο από τη γωνία θ . Παρόμοια συμπεριφορά είναι αναμενόμενη για τις συστοιχίες των MWCNTs.

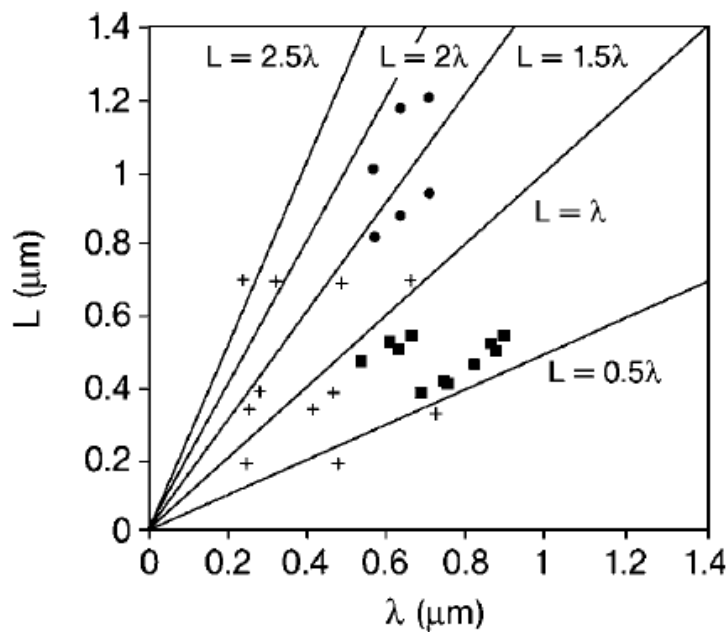
Προσομοιώσεις σε υπολογιστές της ηλεκτρομαγνητικής απόκρισης από συστοιχία δίπολικών κεραίων δίνουν καμπύλες ανάκλασης για διάφορα μήκη κεραίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18b. Και τα πειραματικά (Σχήμα 5.18a) και τα

⁴⁵ Σκέδαση ή σκέδαση του φωτός ονομάζεται ο διασκορπισμός των φωτεινών ακτινών που ακολουθεί όταν προσπέσουν σε μικροσκοπικά σωματίδια, έτσι ώστε να διαχέονται στο χώρο χωρίς να φαίνονται αυτές. Η οπτική αντίληψη του γεγονότος αυτού ονομάζεται φαινόμενο σκέδασης. Η σκέδαση είναι προϊόν πολλαπλής ανάκλασης. Η λέξη ετυμολογικά προέρχεται από το αρχαίο ρήμα σκεδάννυμι ή σκέδω που σημαίνει διασκορπίζω.

θεωρητικά (Σχήμα 5.18b) αποτελέσματα ακολουθούν εκ του σύνεγγυς την κατάσταση ιδανικής δίπολης κεραίας, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι MWCNTs μπορούν να λειτουργήσουν ως κεραίες φωτός. Πράγματι, στο Σχήμα 5.19 οι θέσεις των μέγιστων εντάσεων των διαφόρων αντανάκλασεων σχεδιάζονται σε σχέση με τον αντίστοιχο μέσο όρο μήκους L κεραίας. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν την ιδανική κατάσταση διπολικής κεραίας (Εξίσωση 5.1, με $f = 1$) για τα διαφορετικά m .



Σχήμα 5.18 (α) Πειραματικές καμπύλες αντανάκλασης για διάφορα μήκη κεραίων. (β) Προσομοίωση με H/Y καμπυλών αντανάκλασης για διάφορα μήκη κεραίων. Σύγκριση μεταξύ μιας πειραματικής καμπύλης (για την θέση A5), εμφανιζόμενη ως τετράγωνα, και η αντίστοιχη υπολογιζόμενη απόκριση φαίνεται στο (β).

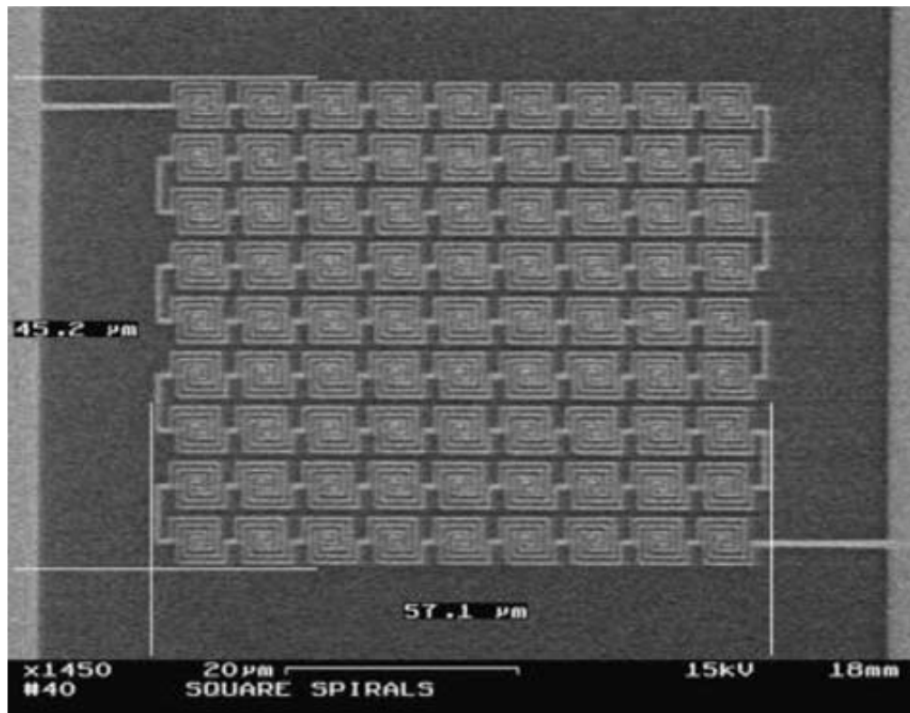


Σχήμα 5.19 θέσεις των μέγιστων εντάσεων των διαφόρων αντανάκλασεων σε σχέση με τον αντίστοιχο μέσο όρο μήκους L κεραίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται ως συμπαγείς κύκλοι και τετράγωνα. Οι σταυροί επισημαίνουν τη θέση των διακεκριμένων ανώτατων ορίων των θεωρητικών καμπυλών (υποδεικνύεται από τόξα του σχήματος 5.18). Οι συμπαγείς γραμμές αναπαριστούν το ιδανική κατάσταση διπολικής κεραία (Εξίσωση 5.1, με $f = 1$) για τα διάφορα m .

Αυτή η μελέτη εκτιμά επίσης την ποιότητα των νανοσωληνικών κεραιών. Το σχήμα 5.18b δείχνει μια σύγκριση μεταξύ πειραματικών καμπυλών του σχήματος 5.18a (για τη θέση A5) που εμφανίζονται ως τετράγωνα, και την αντίστοιχη υπολογιζόμενη απόκριση. Αυτή η σύγκριση δείχνει ότι ο υπολογισμός, για τον οποίο υποθέσαμε άπειρη αγωγιμότητα της μεταλλικής κεραίας, αναπαράγει και το μετρούμενο πλάτος της γραμμής της κορυφής. Η επίδραση του μήκους της κεραίας μπορεί να ρυθμιστεί με τον έλεγχο του μήκους των νανοσωληνών, και σε κάποιο βαθμό με την πυκνότητα των συστοιχιών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας «ανάπτυξης» τους, καθιστώντας τις συσκευές επιλεκτικές κατά συχνότητα. Μόλις λυθούν τα μηχανικά προβλήματα κλίμακας, θα ανοίξει η πόρτα στην άφθονη ηλιακή ενέργεια.

Κυψέλες όπως αυτές σύντομα θα ενσωματωθούν σε εύκαμπτα φιλμ. Πράγματι, μία άλλη παρόμοια μέθοδος για την ανάπτυξη τεχνολογίας φθηνής ηλιακής ενέργειας που θα μπορούσε να αποτυπωθεί σε εύκαμπτα υλικά, που εξακολουθούν να αντλούν ενέργεια από τον ήλιο και μετά την δύση του, έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα. Η τεχνολογία αυτή, χρησιμοποιεί μια ειδική διαδικασία κατασκευής, τυπώνοντας μικροσκοπικά τετράγωνα σπирάλ, ή νανο-κεραίες χρυσού σε ένα φύλλο πλαστικού. Κάθε τετράγωνο περιέχει περίπου 260 εκατομμύρια κεραιές. Αυτή η πατενταρισμένη διαδικασία κατασκευής, από την ομάδα Idaho National Laboratory (INL), αποδεικνύει ότι τα χαρακτηριστικά νανοκλίμακας μπορούν να παραχθούν σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η διαδικασία κατασκευής τυπώνει μικροσκοπικά τετράγωνα σπирάλ αγωγίμου μετάλλου σε ένα φύλλο πλαστικού. Κάθε νανο-κεραία σπειροειδούς συμπλέγματος έχει διάμετρο όσο το 1/25 της διαμέτρου μιας ανθρώπινης τρίχας (Σχήμα 5.20). Οι κλίμακες μήκους για τις κεραιές είναι ανάλογες του μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας (Πίνακας 5.2), δηλαδή με μήκος λιγότερο από 1 μm έως μερικά μm, ενώ το πλάτος στο ευρύτερο σημείο του κυμαίνεται στην περιοχή κάτω του μm.

Οι νανοκεραίες απορροφούν ενέργεια στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, λίγο έξω από το εύρος αυτού που είναι ορατό με το μάτι. Επειδή ο ήλιος ακτινοβολεί πολύ υπέρυθρη ενέργεια, μέρος της οποίας απορροφάται από τη γη όπου αργότερα απελευθερώνεται ως ακτινοβολία για ώρες μετά την δύση του ηλίου, οι νανο-κεραίες μπορούν να πάρουν ενέργεια τόσο από το ηλιακό φως και όσο και από την θερμότητα της γης, με υψηλότερη απόδοση από τις συμβατικές ηλιακές κυψέλες. Η ομάδα INL υπολογίζει ότι μεμονωμένες νανο-κεραίες μπορούν να απορροφήσουν περίπου το 80% της διαθέσιμης ενέργειας. Διπλής όψης πάνελ θα μπορούσε να απορροφήσει ένα ευρύ φάσμα της ενέργειας από τον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιώντας τη μια πλευρά του πάνελ, ενώ η άλλη πλευρά θα μπορούσε να σχεδιαστεί για να λάβει τη στενοζωνική συχνότητα της ενέργειας που παράγεται από την ακτινοβολούμενη θερμότητα της γης.



Σχήμα 5.20 Μια σειρά από νανο-κεραίες, τυπωμένες με χρυσό, απεικονίστηκαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Το εναποτιθέμενο σύρμα έχει πάχος, περίπου, χιλίων ατόμων. Ένα εύκαμπτο πάνελ διασυνδεδεμένων νανο-κεραιών μπορεί μια μέρα να αντικαταστήσει τα βαριά, ακριβά ηλιακά πάνελ. (Φωτογραφία: Idaho National Laboratory).

Πίνακας 5.2 Κλίμακες μήκους και χρόνου της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Συχνότητα (Hz)	Μήκος κύματος στο κενό (m)	Χρόνος Περιόδου (s)	Καθεστώς / Πηγή
10^9	3×10^{-1}	1×10^{-9}	μικρόκυμα
10^{11}	3×10^{-3}	1×10^{-11}	κύμα χιλιοστόμετρου (mmW)
10^{12}	3×10^{-4}	1×10^{-12}	άπω υπέρυθη ακτινοβολία
10^{14}	3×10^{-6}	1×10^{-14}	υπέρυθη ακτινοβολία
10^{15}	3×10^{-7}	1×10^{-15}	υπεριώδης ακτινοβολία

Η ομάδα INL οραματίζεται τις κεραίες ότι μπορεί μια μέρα να παραχθούν σαν αλουμινόχαρτο ή πλαστικό περιτύλιγμα σε μηχανές R2R. Μέχρι στιγμής, έχουν παρουσιάσει τη διαδικασία αποτύπωσης με κυκλικές σφραγίδες έξι ιντσών, κάθε μία δε να φέρει πάνω από 10 εκατομμύρια κεραίες. Τα ίδια τα κυκλώματα μπορεί να κατασκευαστούν από έναν αριθμό διαφορετικών αγώγιμων μετάλλων, και οι νανο-κεραίες μπορούν να εκτυπωθούν σε λεπτό, εύκαμπτο υλικό όπως το πολυαιθυλένιο,



Σχήμα 5.21 Ερευνητής της ομάδας INL, Steven Novack, κρατά ένα πλαστικό φύλλο από συστοιχίες νανο-κεραιών, που δημιουργήθηκε με την εναπόθεση αγωγίμου μετάλλου στην ανάγλυφη δομή της κεραία που είχε δημιουργηθεί (Φωτογραφία Idaho National Laboratory).

ένα πλαστικό που χρησιμοποιείται ευρέως σε σακούλες και πλαστικά περιτυλίγματα. Στην πραγματικότητα, η ομάδα ήταν η πρώτη που τύπωσε νανο-κεραίες σε πλαστικές σακούλες που χρησιμοποιούνται για την διανομή της εφημερίδας “The Wall Street Journal”, επειδή είχαν ακριβώς το σωστό πάχος (Σχήμα 5.21).

Συμπεράσματα

Με βάση τα όσα έχουμε αναφέρει παραπάνω, μπορούμε συμπερασματικά να πούμε ότι οι Λ/Φ Φ/Β συσκευές είναι ελκυστικές, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης του ενεργού υλικού που απαιτείται. Ένα ακόμα στοιχείο που κάνει ελκυστικές τις Λ/Φ Φ/Β συσκευές είναι ο σχεδιασμός, η κομψότητα και η δυνατότητα ενσωμάτωσης τους σε πλειάδα εφαρμογών, όπως υφάσματα, κτίρια κτλ.

Η απόδοση όλων των Λ/Φ ηλιακών κυψελών που μελετώνται σήμερα βελτιώνεται σταθερά, λόγω της όλο και καλύτερης κατανόησης των χαρακτηριστικών των δομικών υλικών κατασκευής των Λ/Φ Φ/Β, σε επίπεδο χημικών και οπτικο-ηλεκτρονικών χαρακτηριστικών, καθώς και την αποτελεσματική αξιοποίηση κάποιων ιδιοτήτων για ορισμένες λειτουργίες όπως η παθητικότητα, η ενεργοποίηση, σκέδαση/ ανακύκλωση φωτονίων, η διαβάθμιση του ενεργειακού κενού κλπ. Αναμένεται περαιτέρω πρόοδος στο «κλείσιμο» της ψαλίδας μεταξύ της αποδοτικότητας που έχει επιτευχθεί και της θεωρητικής αποδοτικότητας, με πιο λεπτομερή κατανόηση του ρόλου των ηλεκτρονικών διασυνδέσεων στην πολυεπίπεδη διάρθρωση των συσκευών.

Η οικονομική βιωσιμότητα μίας κυψέλης θα παραμείνει το πιο σημαντικό κριτήριο για την παραγωγή της σε εμπορική κλίμακα. Για μια γκάμα εφαρμογών χαμηλής και μέσης ισχύος, για τις αναπτυσσόμενες χώρες με μεγάλες ενεργειακές ανάγκες, το watts/m^2 μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο εφ' όσον ο λόγος δολάριο/watt βρίσκεται σε αποδεκτά επίπεδα. Αυτό σημαίνει ότι η προσπάθεια επίτευξης μεγαλύτερης αποδοτικότητας, θα πρέπει να συνεχιστεί, αλλά θα χρειαστεί πολύ περισσότερη προσπάθεια για την ανάπτυξη απλούστερων και φθηνότερων διαδικασιών κατασκευής πάνελ με ικανοποιητικές επιδόσεις (5-10% PCE).

Κλείνοντας δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε την σημαντικότητα της Φ/Β τεχνολογίας, στο σύνολό της, στην προστασία του περιβάλλοντος. Κάθε kWh που παράγεται από Φ/Β, και όχι από συμβατικά καύσιμα, αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση κατά μέσο όρο 1,3 τόνων CO₂. Χρειάζονται 2 στρέμματα δάσους ή περίπου 100 δέντρα για να απορροφήσουν αυτήν την ποσότητα CO₂. Για να παραχθεί η ίδια ηλεκτρική ενέργεια με πετρέλαιο, απαιτούνται 2,2 βαρέλια πετρελαίου κάθε χρόνο. Από περιβαλλοντική άποψη, αποφεύγοντας 1300 Kg CO₂ ετησίως είναι σαν κάνει ένα αυτοκίνητο 7000 Km λιγότερα κάθε χρόνο. Οι εκπομπές CO₂ πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλάζοντας το κλίμα της Γης.

Πίνακας Συντομεύσεων

CIGS	Δισεληνοϊνδιογαλλιούχος χαλκός
STC	Τυπική κατάσταση δοκιμής
AM	Φάσμα οπτικής μάζας
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά
Λ/Φ	Λεπτού φιλμ
LCOE	Διάγραμμα ισοζυγίου κόστους ενέργειας
a-Si	Άμορφο πυρίτιο
a-SiGe	Άμορφο πυρίτιο του γερμανίου
ΟΟΣΑ	Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης
R2R	Διαδικασία ρολό σε ρολό
ITO	Οξείδιο του ινδίου του κασσίτερου
TCO	Διαφανές αγωγίμο οξείδιο
EQE	Κβαντικός βαθμός απόδοσης
LDS	Παράγοντας μείωσης φθορισμού
CIS	Ινδιοσεληνιούχος χαλκός
PCE	Απόδοση μετατροπής ισχύος
BHJ	Κυψέλη μαζικής ετεροδομής
AFM	Μικροσκοπία ατομικής δύναμης
TEM	Μικροσκόπιο διέλευσης ηλεκτρονίων
FF	Συντελεστής πλήρωσης
XRD	Περίθλαση ακτινών X

CB	Ζώνη αγωγιμότητας
IPCE	Απόδοση μετατροπής προσπιπτόντων φωτονίων σε ρεύμα
LHE	Απόδοση συγκομιδής φωτός
IL	Ιοντικό υγρό
BIPV	Ενσωματωμένα Φ/Β κτιρίων
SB-QWSC	Ισόρροπης τάσης ηλιακές κυψέλες κβαντικών φρεατίων
QW	Κβαντικά φρεάτια
DBR	Ανακλαστήρας κατανομής Bragg
CPV	Φ/Β συστήματα συγκέντρωσης
MBE	Επαξόνια ανάπτυξη μοριακής δέσμης
SWNT	Μονό τοίχωμα νανοσωλήνων άνθρακα
PAH	Μόρια νανογραφενίου
RNA	Ανορθωτικές νανοκεραίες
MWCNT	Συστοιχία ευθυγραμμισμένων πολυστρωματικών νανοσωλήνων άνθρακα
PECVD - EBPVD	Χημική εναπόθεση ενισχυμένου ατμού πλάσματος
ASEC	Κεραία μετατροπής ενέργειας
MLCT	Μεταφορά φορτίου μετάλλου προς σύμπλοκο
MO	Μοριακά τροχιακά
bpy	Ισομερές της οικογένειας διπυριδίνης
DSC	Βαφο-ευαισθητοποιημένη ηλιακή κυψέλη
CE	Μεταλλικό βοηθητικό ηλεκτρόδιο

Βιβλιογραφία – Πηγές

Για την εκπόνηση της πτυχιακής «**Εύκαμπτες Ηλιακές Κουφέλες**» χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω βιβλιογραφία και ιστογραφία:

- [1] Nordhuas, T. and Shellenberger, M. (2007) *Break Through: From The Death of Environmentalism to the Politics of Possibility*, Houghton Mifflin, New York.
- [2] Ozin, G. and Arsenault, A. (2006) *Nanochemistry: A Chemical Approach to Nanomaterials*, Royal Society of Chemistry Publishing, Cambridge.
- [3] Nelson, J. (2003) *The Physics of Solar Cell*, Imperial College Press, London.
- [4] Conibeer, G. (2007) Third-generation photovoltaics. *Materials Today*
- [5] Luque, A. and Hegedus, S. (eds) (2003) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York
- [6] Hepp, A.F., Bailey, S.G. and Raffaele, R.P. (2005) *Inorganic Photovoltaic Materials and Devices: Past, Present and Future, in Organic Photovoltaics. Mechanisms, Materials and Devices* (eds S.S. Sun and N.S. Sariciftici), Taylor and Francis.
- [7] Hegde, G. and Nayer, C.V. (2007) *Marketing Photovoltaic Technologies in Developing Countries, in Renewable Resources and Renewable Energy – A Global Challenge* (eds M. Graziani and P. Fornasiero), CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton FL.
- [8] Ullal, H.S. and von Roedern, B. *Thin Film CIGS and CdTe Photovoltaic Technologies: Commercialization, Critical Issues, and Applications*, παρουσιάστηκε στο 22ο Ευρωπαϊκό Συνέδριο Photovoltaic Solar Energy ,στο Μιλάνο, September 3–7, 2007.
- [9] Gregg, A., Blieden, R., Chang, A. and Ng H. *Performance Analysis of Large Scale, Amorphous Silicon Photovoltaic Power Systems*, 31st Institute of Electrical and Electronics Engineers, Photovoltaic Specialist Conference and Exhibition, January 3–7, 2005, Lake Buena Vista, Florida USA.
- [10] Noufi, R. and Zweibel, K. (2006) *High-Efficiency CdTe and CIGS Thin film Solar Cells: Highlights and Challenges*, Conference Paper, WPEC4, Hawaii.
- [11] Rau, U. and Schock, H.W. (1999) *Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells-recent achievements, current understanding, and future challenges*.

- [12] Πειραματική μελέτη Φ/B στοιχείων A/Φ , (2011) Διπλωματική εργασία Ι.Σ. Λαγόπουλου Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.
- [13] Schock, H.-W. and Noufi, R. (2000) *CIGS based solar cells for the next millennium. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.*
- [14] Shafarman, W.N., Basol, B.M., Britt, J.S., Hall, R.B. and Rocheleau, R.E. (1997) *Semiconductor processing and manufacturing. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.*
- [15] McCandless, B. and Sites, J.R. (2003) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (eds A. Luque and S.Hegedus), Wiley
- [16] Fthenakis, V.M. (2004) *Life Cycle Impact Analysis of Cadmium in CdTe PV Production. Renewable and Sustainable Energy Reviews.*
- [17] Richards, B.S. and McIntosh, K.R. (2006) *Enhancing the Efficiency of Production of CdS/CdTe PV Modules by Overcoming Poor Spectral Response at Short Wavelengths Via Luminescence Down- Shifting, Photovoltaic Energy Conversion*, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference.
- [18] Dimmlera, B. and Wächter, R. (2007) *Manufacturing and application of CIS solar modules. Thin Solid Films*
- [19] Green, M.A. (2006) *Consolidation of Thin film Photovoltaic Technology: The Coming Decade of Opportunity. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.*
- [20] Tang, C.W. (1986) *Two-layer organic photovoltaic cell. Applied Physics Letters*
- [21] Sariciftci, N.S., Smilowitz, L., Heeger, A.J. and Wudl, F. (1992) *Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene.*
- [22] Spanggaard, H. and Krebs, F.C. (2004) A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells.*
- [23] Kim, Y., Cook, S., Tuladhar, S.M., Choulis, S.A., Nelson, J., Durrant, J.R., Bradley, D.D.C., Giles, M., McCulloch, I., Ha, C.S. and Ree, M. (2006) *A strong regioregularity effect in self-organizing conjugated polymer films and highefficiency polythiophene:fullerene solar cells.* Nature Materials.
- [24] Sun, S.-S., Zhang, C., Ledbetter, A., Choi, S., Seo, K. and Bonner, C.E., Jr (2007) *Photovoltaic enhancement of organic solar cells by a bridged donor-acceptor block copolymer approach.* Applied Physics Letters.

- [25] Padinger, F., Rittberger, R.S. and Sariciftci, N.S. (2003) *Effects of postproduction treatment on plastic solar cells*. Advanced Functional Materials.
- [26] Peet, J., Kim, J.Y., Coates, N.E., Ma, W.L., Moses, D., Heeger, A.J. and Bazan, G.C. (2007) *Efficiency enhancement in low-bandgap polymer solar cells by processing with alkane dithiols*. Nature Materials.
- [27] Kim, J.Y., Lee, K., Coates, N.E., Moses, D., Nguyen, T.-Q., Dante, M. and Heeger, A.J. (2007) *Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing*. Science.
- [28] Hoth, C.N., Choulis, S.A., Schilinsky, P. and Brabec, C.J. (2007) *High photovoltaic performance of inkjet printed polymer: fullerene blends*. Advanced Materials.
- [29] Hoppe, H., Niggemann, M., Winder, C., Kraut, J., Hiesgen, R., Hinsch, A., Meissner, D. and Sariciftci, N.S. (2004) *Nanoscale morphology of conjugated polymer/fullerene-based bulkheterojunction solar cells*. Advanced Functional Materials.
- [30] Kim, S.-S., Na, S.-I., Jo, J., Tae, G. and Kim, D.-Y. (2007) *Efficient Polymer Solar Cells Fabricated by Simple Brush Painting*. Advanced Materials.
- [31] Mayer, A.C., Scully, S.R., Hardina, B.E., Rowell, M.W. and McGehea, M.D. (2007) *Polymer-based solar cells*. Materials Today.
- [32] Brabec, C., Dyakonov, V. and Scherf, U. (2008) *Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics, and Manufacturing Technologies*, Wiley-VCH, Weinheim.
- [33] Graham-Rowe, D. (2007) *Solar cells get flexible*. Nature Photon.
- [34] Balzani, V., Credi, A. and Venturi, M. (2008) *Photochemical Conversion of Solar Energy*.
- [35] Grätzel, M. (2005) *Solar conversion by dye-sensitized photovoltaic cells*.
- [36] Hagemann, I.B. (11–13 September 2007) *New perspectives for building integrated photovoltaics*, Εργασίες 2^ο Διεθνούς Συνεδρίου με θέμα “Industrialisation of DSC”, St Gallen, Ελβετία (DSC-IC 2007).
- [37] Peter, L.M. (2007) *Dye-sensitized nanocrystalline solar cells*. Physical Chemistry Chemical Physics.
- [38] Nakade, S., Kubo, W., Saito, Y., Kanzaki, T., Kitamura, T., Wada, Y. and Yanagida, S. (2003) *Influence of measurement conditions on electron diffusion in nanoporous TiO₂ films: effects of bias light and dye adsorption*. Journal of Physical Chemistry.

- [39] Ito, S., Zakeeruddin, S.M., Humphry-Baker, R., Liska, P., Charvet, R., Comte, P., Nazeeruddin, M.K., Péchy, P., Takata, M., Miura, H., Uchida, S. and Grätzel, M. (2006) *High-efficiency organic-dye sensitized solar cells controlled by nanocrystalline-TiO₂ electrode thickness*. *Advanced Materials*.
- [40] Lenzmann, F.O. and Kroon, J.M. (2007) *Recent advances in dye-sensitized solar cells*. *Advances Optoelectronics*.
- [41] Dürr, M., Schmid, A., Obermaier, M., Rosselli, S., Yasuda, A. and Nelles, G. (2005) *Low-temperature fabrication of dyesensitized solar cells by transfer of composite porous layers*.
- [42] Yamaguchi, T., Tobe, N., Matsumoto, D. and Arakawa, H. (2007) *Highly efficient plastic substrate dye-sensitized solar cells using a compression method for preparation of TiO₂ photoelectrodes*. *Chemical Communications*.
- [43] Haque, S.A., Palomares, E., Upadhyaya, H.M., Otle, L., Potter, R.J., Holmes, A.B. and Durrant, J.R. (2003) *Flexible dye sensitised nanocrystalline semiconductor solar cells*. *Chemical Communications*.
- [44] Upadhyaya, H.M., Hirata, N., Haque, S.A., de Paoli, M.-A. and Durrant, J.R. (2006) *Kinetic competition in flexible dye sensitised solar cells employing a series of polymer electrolytes*. *Chemical Communications*.
- [45] Ozin, G.A. and Arsenault, A.C. (2005) *Nanochemistry*, RSC Publishing, Cambridge
- [46] Nishimura, S., Abrams, N., Lewis, B.A., Halaoui, L.I., Mallouk, T.E., Benkstein, K.D., van de Lagemaat, J. and Frank, A.J. (2003) *Standing Wave Enhancement of Red Absorbance and Photocurrent in Dye-Sensitized Titanium Dioxide Photoelectrodes Coupled to Photonic Crystals*. *Journal of the American Chemical Society*.
- [47] Halaoui, L.I., Abrams, N.M. and Mallouk, T.E. (2005) *Increasing the Conversion Efficiency of Dye-Sensitized TiO₂ Photoelectrochemical Cells by Coupling to Photonic Crystals*. *Journal of Physical Chemistry*.
- [48] Bisquert, J. (2004) *Chemical diffusion coefficient of electrons in nanostructured semiconductor electrodes and dyesensitized solar cells*. *Journal of Physical Chemistry*.
- [49] Kopidakis, N., Neale, N.R., Zhu, K., van de Lagemaat, J. and Frank, A.J. (2005) *Spatial location of transport-limiting traps in TiO₂ nanoparticle films in dye-sensitized solar cells*. *Applied Physics Letters*.

- [50] Peter, L.M. (2007) *Characterization and modeling of dye-sensitized solar cells*. Journal of Physical Chemistry
- [51] Greijer Agrell, H., Lindgren, J. and Hagfeldt, A., (2004) *Coordinative interactions in a dye-sensitized solar cell*. Journal of Photochemistry and Photobiology .
- [52] Nazeeruddin, M.K., Pechy, P., Renouard, T., Zakeeruddin, S.M., Humphry-Baker, R., Comte, P., Liska, P., Cevey, L., Costa, E., Shklover, V., Spiccia, L., Deacon, G.B., Bignozzi, C.A. and Grätzel, M. (2001) *Engineering of efficient panchromatic sensitizers for nanocrystalline TiO₂-based solar cells*. Journal of the American Chemical Society.
- [53] Cid, J.-J., Yum, J.-H., Jang, S.-R., Nazeeruddin, M.K., Martínez-Ferrero, E., Palomares, E., Ko, J., Grätzel, M. and Torres, T. (2007) *Molecular co-sensitization for efficient panchromatic dye-sensitized solar cells*. Angewandte Chemie-International Edition.
- [54] Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P. and Qiu, Y. (2006) *Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells.
- [55] Kuang, D., Klein, C., Zhang, Z., Ito, S., Moser, J.-E., Zakeeruddin, S.M. and Grätzel, M. (2007) *Stable, high-efficiency Organic-Inorganic Thin Films ionic-liquid-based mesoscopic dyesensitized solar cell*.
- [56] Chappel, S., Grinis, L., Ofir, A. and Zaban, A. (2005) *Extending the Current Collector into the Nanoporous Matrix of Dye Sensitized Electrodes*. Journal of Physical Chemistry.
- [57] Horiuchi, T., Miura, H., Sumioka, K. and Uchida, S. (2004) *High Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells Based on Metal-Free Indoline Dyes*. Journal of the American Chemical Society.
- [58] Nüesch, F. (4–8, September 2006) *Organic and hybrid solar cells*, 21^o Ευρωπαϊκό Εκθεσιακό Συνέδριο, Δρέσδη.
- [59] Hinsch, A., Putyra, P., Würfel, U., Brandt, H., Skupien, K., Drewitz, A., Einsele, F., Gerhard, D., Gores, H., Hemming, S., Himmler, S., Khelashvili, G., Nasmudinova, G., Opara-Krasovec, U., Rau, U., Sensfuß, S., Walter, J. and Wasserscheid, P. (7 September 2007) *Developments towards low-cost Dye Solar Modules*, 22^o Ευρωπαϊκό Εκθεσιακό Συνέδριο, Μιλάνο.
- [60] Lewis, N.S. (2007) *Toward Cost-Effective Solar Energy Use*. Science.

- [61] Albini, A. and Fagnoni, M. (2008) 1908: *Giacomo Ciamician and the Concept of Green Chemistry*
- [62] Balzani, V., Credi, A. and Venturi, M. (2008) *Photochemical Conversion of Solar Energy*.
- [63] Ciamician, G. (1912) *The Photochemistry of the Future*.
- [64] Barnham, K.W.J., Mazzer, M. and Clive, B. (2006) *Resolving the energy crisis: nuclear or photovoltaics?* Nature Materials.
- [65] Hoffert, M.I., Caldeira, K., Jain, A.K., Haites, E.F., Harvey, L.D.D., Potter, S.D., Schlesinger, M.E., Schneider, S.H., Watts, R.G., Wigley, T.M.L. and Wuebbles, D.J. (1998) *Energy Implications of Future Stabilization of Atmospheric CO₂ Content*.
- [66] McDonald, J. (April 23 2007) *Solar power pays off for Chinese entrepreneur*, The Associated Press.
- [67] Pacala, S. and Socolow, R. (2004) *Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies*.
- [68] Rim, S.-B., Zhao, S., Scully, S.R., McGehee, M.D. and Peumans, P. (2007) *An effective light trapping configuration for thin-film solar cells*.
- [69] Goswami, D.Y., Vijayaraghavan, S., Lu, S. and Tamm, G. (2004) *New and emerging developments in solar energy*. Solar Energy.
- [70] Green, M.A. (2003) *Third Generation Photovoltaics: Ultra-High Efficiency at Low Cost*, Springer-Verlag, Berlin.
- [71] Mazzer, M., Barnham, K.W.J., Ballard, I.M., Bessiere, A., Ioannides, A., Johnson, D.C., Lynch, M.C., Tibbits, T.N.D., Roberts, J.S., Hill, G. and Calder, C. (2006) *Progress in quantum well solar cells*. Thin Solid Films.
- [72] Sandler, G. (October 16 2007) *Bar Ilan University makes solar cells 10x bigger thanks to Nanotechnology*, Israel-Times.com.
- [73] Aagesen, M., Johnson, E., Sørensen, C.B., Mariager, S.O., Feidenhans, R., Spiecker, E., Nygerd, J. and Lindelof, P.E. (2007) *Molecular beam epitaxy growth of free-standing plane-parallel InAs nanoplates*. Nature Nanotechnology.
- [74] Chen, C., Shehata, S., Fradin, C., Couteau, C., Weihs, G. and LaPierre, R.R. (2007) *Self-directed growth of AlGaAs core-shell nanowires for visible light applications*.

- [75] Lawson, G., Gonzaga, F., Huang, J., de Silveira, G., Brook, M.A. and Adronov, A. (2008) *Au–Carbon Nanotube Composites From Self-Reduction Of Au³⁺ Upon Poly (Ethylene Imine) Functionalized SWNT Thin Films*. Journal of Materials Chemistry.
- [76] Wang, X., Zhi, L. and Müllen, K. (2008) *Transparent, Conductive Graphene Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells*.
- [77] Zhou, S.Y., Gweon, G.-H., Fedorov, A.V., First, P.N., de Heer, W.A., Lee, D.-H., Guinea, F., Castro Neto, A.H. and Lanzara, A., (2007) *Substrate-induced bandgap opening in epitaxial graphene*.
- [78] Bailey, R.L. (1972) *Journal of Engineering for Power*.
- [79] Wang, Y., Kempa, K., Kimball, B., Carlson, J.B., Benham, G., Li, W.Z., Kempa, T., Rybczynski, J., Herczynski, A. and Ren, Z.F. (2004) *Receiving and transmitting light-like radio waves: Antenna effect in arrays of aligned carbon nanotubes*. Applied Physics Letters.

Ιστογραφία:

- [1] <http://www.wikipedia.org/> , “*The free encyclopedia*”
- [2] <http://www.covertec.gr/history> , “*Ιστορική Εξέλιξη Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*”
- [3] <http://www.arvisolar.gr/Contents.aspx?CatId=14&lang=gr> , “*Ιστορία των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*”
- [4] <http://www.pveducation.org/> , “*A collection of resources for the photovoltaic educator.*”
- [5] http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php , “*Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών στοιχείων*”
- [6] <http://www.inl.gov/featurestories/2007-12-17.shtml> , *Idaho National Laboratory Feature Story Archive*
- [7] http://www.er.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf , US Department of Energy Office of Science , *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization*, (2005).
- [8] <http://www.redherring.com/home/15061> , Kho, J. (6 January 2006) *Solar Power, the Chinese Way*. Red Herring.
- [9] <http://www.pv.unsw.edu.au> , ιστοσελίδα του πανεπιστημίου *New South Wales of Photovoltaics Engineering*

- [10] http://www.eupvplatform.org/fileadmin/Documents/PVPT_SRA_Complete_070604.pdf , The European Photovoltaic Technology Platform, Strategic Research Agenda (SRA) for Photovoltaic Technology, June 2007.
- [11] http://www.avancis.de/fileadmin/user_upload/Why_ThinFilmPV_01-07.pdf , Avancis, *Why Thin Film Technology for Photovoltaics?*
- [12] <http://www.nanomarkets.net> , NanoMarkets, *Materials Markets for Thin film and Organic Photovoltaics*, February 2008.
- [13] http://www.eere.energy.gov/solar/solar_america , Cornelius, C. Venture Investing in Solar - 2007/2008. *Investment Theses, Market Gaps, and Opportunities*, 2008.
- [14] <http://www.answers.com>
- [15] <http://www.sta.com.au/downloads/DSC%20Booklet.pdf> , Dyesol, *DSC Solar Technology for the New Millenium*, (2006).
- [16] http://www.tytlabs.co.jp/english/news/tec/etech41_1_higuchi.pdf , *R&D Review of Toyota CRDL Vol.41 No.1*.
- [17] <http://www.solaronix.ch/technology/dyesolarcells/>.
- [18] http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf , *Key World Energy Statistics 2007*, International Energy Agency, Paris, 2007.
- [19] <http://www.worldwatch.org/files/pdf/renewables2007.pdf> , Worldwatch Institute, Washington, DC , (2007) *Renewables 2007- Global Status Report*,
- [20] www.tytlabs.co.jp/english/news/tec/elech41_1_higuchi.pdf
- [21] www.greenpeace.org/Greece
- [22] www.helapco.gr/ims/file/news/2011/GP_PV_benefits_july11.pdf